

Der Einfluss von Müdigkeit auf das
Fahr- Blick- & Sprachverhalten unter der Betrachtung
verschiedener methodischer Ansätze und die Konsequenz
für die Entwicklung von Müdigkeitsassistenzsystemen

Von der Fakultät für Lebenswissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)
genehmigte
D i s s e r t a t i o n

von Klaus Reinprecht
aus Voitsberg / Österreich

1. Referent: Professor Dr. Mark Vollrath
2. Referent: Professor Dr. Jarek Krajewski
eingereicht am: 19.06.2013
mündliche Prüfung (Disputation) am: 26.09.2013

Druckjahr 2013

Vorveröffentlichungen der Dissertation

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät für Lebenswissenschaften, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Publikationen in Zeitschriften

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2010). „Du bist müde! Halt an!“ – „Nein, so müde bin ich gar nicht.“ *Blutalkohol*, 47 (5, Suppl. II). S. 25. [Abstract]

Vorträge/Poster

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2013). *Blickverhalten unter dem Einfluss von Müdigkeit auf einer monotonen Autobahnfahrt*. 55. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TEAP), Wien, 25.03. - 27.03.2013.

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2012). *Effekte eines Lichtwarnsystems auf die Reaktionsfähigkeit der Fahrer unter dem besonderen Einfluss des Fahrerzustands Müdigkeit*. 5. VDI-Tagung Fahrerassistenz, München, 15.05.-16.06.2012.

Vollrath, M., Muhrer, E., Reinprecht, K. (2012). *Eine Realfahrtstudie zur Müdigkeitsklassifizierung in Abhängigkeit der Fahrumgebung*. Beitrag auf der 54. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Mannheim, 01.04-04.04.2012.

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011). *Müde Autofahrer: Was fühlen Sie, was zeigen Sie, was sagen Sie?* 7. Tagung der Fachgruppe Arbeits-, Organisations- und Wirtschaftspsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Rostock, 07.-09.09.2011.

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011). *Lichtassistenz wirkt - Auch bei müden Fahrern*. Beitrag auf dem 12. Braunschweiger Symposiums AAET (Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel), Braunschweig, 09.-10.02.2011.

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2010). „Du bist müde! Halt an!“ – „Nein, so müde bin ich gar nicht.“ Beitrag auf dem 6. Gemeinsamen Symposium der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin (DGVM) und der Deutschen Gesellschaft für Verkehrspsychologie (DGVP), Tübingen, 01.10.-02.10.2010.

Beiträge in Tagungsbänden

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2012). *Effekte eines Lichtwarnsystems auf die Reaktionsfähigkeit der Fahrer unter dem besonderen Einfluss des Fahrerzustands Müdigkeit*. 5. VDI-Tagung Fahrerassistenz, Schwerpunkt Vernetzung (S. 1-11). München: TÜV Süd.

Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011). *Lichtassistenz wirkt - auch bei müden Fahrern*. In Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 136-149). Braunschweig: ITS - Niedersachsen e.V.

Diese Dissertation ist nur durch die Unterstützung einiger Menschen möglich geworden.

Namentlich sind dies (alphabetisch sortiert):

Frau Christina Dreier (Versuchsdurchführung Simulator)

Frau Irina Hahn (Versuchsdurchführung Simulator)

Frau Dr. Elke Muhrer (Entwicklung der objektiven Müdigkeitsskala sowie Müdigkeitsbewertung der Fahrer)

Herr Daniel Nause B.Sc. (Versuchsdurchführung Realfahrzeug)

Frau Patricia Nowak M.Sc. (Müdigkeitsbewertung der Fahrer und Versuchsdurchführung)

Herr Prof. Dr. Mark Vollrath (Betreuung der Dissertation)

... für meine Mamsi! † 2012

Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit wird der Fahrerzustand Müdigkeit in empirischen Fahrversuchen im Labor und in der Realität quasi-experimentell untersucht. In diesen Untersuchungen werden unterschiedliche Müdigkeitszustände induziert und die Auswirkungen auf das Fahr- Blick- und Sprachverhalten analysiert. Diese Ergebnisse werden verwendet, um das Fahrverhalten eines müden Fahrers anhand von klar definierten Grenzen vom Fahrverhalten eines wachen Fahrers zu unterscheiden und zu beschreiben. Durch die Kombination der unterschiedlichen Parameter wird ein Modell zur Müdigkeitsdetektion erstellt, welches empirisch überprüft wird. Insgesamt geht es in dieser Arbeit darum, den Einfluss von Müdigkeit auf den Fahrer in dessen unterschiedlichen Facetten zu beschreiben, zu detektieren und auf dieser Basis Empfehlungen für die Assistenzsystementwicklung aufzuzeigen.

Ausgangspunkt und Motivation für die vorliegende Arbeit sind die Unfallzahlen. Hier zeigt sich, dass Müdigkeit in ca. 20 % aller Unfälle als Hauptursache identifiziert werden kann. Diese Unfälle finden sich vorwiegend auf gut ausgebauten Landstraßen sowie Autobahnen wieder. Der Grund hierfür ist, dass die Fahrer in diesen reizarmen Situationen wenig beansprucht werden und Müdigkeit dadurch sehr rasch entstehen und/oder schnell ansteigen kann.

Seitens Wissenschaft und Industrie werden enorme Anstrengungen unternommen Müdigkeit zu erkennen und anhand von Fahrerassistenzsystemen Fahrer rechtzeitig auf ihren Zustand hinzuweisen, um so Unfälle zu verhindern. Hierbei steht man allerdings vor einigen Herausforderungen: Für die Entwicklung eines Assistenzsystems zur Müdigkeitserkennung ist es notwendig, den entsprechenden Müdigkeitszustand des Fahrers richtig zu referenzieren. Erst diese Referenzierung ermöglicht es, systematisch nach Unterschieden im Verhalten der Fahrer in Abhängigkeit von Müdigkeit zu suchen und Parameter zu identifizieren, welche sensitiv auf Müdigkeit reagieren. Zu beachten gilt es außerdem, dass diese Analysen nicht nur auf Daten aus Fahr simulatoren und/oder eines Straßentyps beruhen dürfen, da die Übertragbarkeit auf reale Straßenverhältnisse sonst nicht bzw. nur bedingt gegeben ist.

Ein weiterer Aspekt ist, wie die gewonnenen Daten verrechnet werden. Meist finden sich in der Literatur einzelne Fahrparameter, die zur Müdigkeitsdetektion herangezogen werden. Für eine erste grobe Einschätzung mag dies sinnvoll sein, aufgrund der stark unterschiedlichen Effekte von Müdigkeit reicht dies aber nicht aus, um Müdigkeit sicher zu erkennen. Auch die Erweiterung um zusätzliche Verhaltensparameter wird in der Literatur selten diskutiert. Erst eine kombinierte Betrachtung relevanter Parameter könnte es möglich machen, Müdigkeitsauswirkungen zuverlässig zu detektieren. Zusätzlich stellt sich die Frage nach den inter- bzw. intraindividuellen Veränderungen von Müdigkeit und ob bzw. inwiefern man diese in die Berechnungsalgorithmen integrieren sollte.

In der Literatur werden die beschriebenen Punkte kaum berücksichtigt bzw. meist nur unzureichend beschrieben. Um ein umfassendes Bild von Müdigkeitsauswirkungen auf den Fahrer zu erhalten und die Lücken in der Literatur zu schließen wurde sich in vorliegender Arbeit diesen Herausforderungen gestellt.

Hierfür waren insgesamt vier Studien notwendig. Vorab wurde in einem ersten Schritt ein Müdigkeitsreferenzierungsverfahren entwickelt, welches durch ein glei-

ches Skalenniveau eine Vergleichbarkeit von subjektiv empfundener und objektiv beobachteter Müdigkeit ermöglicht und dadurch eine gesicherte Referenzierung von Müdigkeit zulässt. Der signifikante Zusammenhang dieser beiden Verfahren liegt bei $r = .556$. Somit ist es gelungen, ein Müdigkeitsreferenzierungsverfahren aufzustellen, bei dem sowohl subjektiv als auch objektiv die gleichen Müdigkeitswerte vergeben werden. Dieses Messverfahren stellt die Grundlage für die weiteren Analysen dar und wurde in allen vier Studien verwendet.

In Studie eins wurden in einer kontrollierten Umgebung Erkenntnisse über grundlegende Müdigkeitsauswirkungen im Fahrverhalten auf unterschiedlichen Straßentypen (Autobahn, Landstraße) gesammelt. In Studie zwei wurde dies im realen Straßenverkehr wiederholt. In beiden Studien ergab sich jedoch, dass durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Straßentypen zu wenige Daten für eine abhängige Analyse vorlagen. Aus diesem Grund fand in einer zweiten Realfahrtstudie (Studie drei) die Messfahrt nur noch auf der Autobahn statt. Um auch hier wieder den Vergleich mit der Fahrsimulation zu ermöglichen, wurde in Studie vier in der Simulation ebenfalls nur eine Autobahn verwendet, zusätzlich wurden noch Blick- und Sprachdaten mit aufgezeichnet.

Um Auswirkungen von Müdigkeit auf das Fahrverhalten zu untersuchen, wurden aus allen vier Studien die Daten jener Teilnehmer extrahiert, welche Müdigkeitswerte in unterschiedlichen Müdigkeitszuständen (wach, müde, sehr müde) aufwiesen. Durch diese Analyse ist es möglich aufzuzeigen, wie sich Parameter in welchen Müdigkeitszuständen in einer bestimmten Verkehrsumgebung verändern.

Es zeigt sich, dass sowohl das Lenkverhalten, die Spurhaltung als auch das Geschwindigkeitsverhalten sensitiv auf Müdigkeit reagieren. Diese Effekte zeigen sich sowohl in der realen als auch in der simulierten Fahrumgebung sowie auf Landstraßen und Autobahnen.

Fahrer lenken mit zunehmender Müdigkeit weniger, fahren mehr in der Spurmitte, und erhöhen ihre Geschwindigkeit. In der Realität sind diese Effekte prinzipiell etwas kleiner als im Fahrsimulator. Auch die Varianz vieler Fahrparameter ist in der realen Fahrumgebung geringer als in der Simulation.

Vergleicht man die beiden Straßentypen zeigen sich auf der Autobahn einheitlichere Verläufe der Müdigkeitsveränderungen als auf der Landstraße. So finden sich auf der Autobahn 9 von 11 Fahrparameter, die einen gleichen Verlauf in beiden Fahrumgebungen aufweisen, für die Landstraße hingegen nur 5 von 11.

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass es nicht „den einen“ Müdigkeitsparameter gibt, sondern wie relevant es ist, unterschiedliche Versuchssettings und Straßentypen detailliert zu analysieren. Zusätzlich zu dieser Betrachtung zeigt sich aus dem Vergleich von abhängigen und unabhängigen Analysen, dass sich Personen in bestimmten Müdigkeitszuständen sehr ähnlich verhalten.

Dies zeigt sich auch in der Müdigkeitsdetektion. In den dafür durchgeführten Berechnungen kann nachgewiesen werden, dass der müde Fahrer relativ gut, sowohl mit Fahr- als auch mit Blick- und Sprachdaten erkannt werden kann. Der wache Fahrer ist allerdings schwer zu detektieren. Auch durch die Einführung einer Baseline können die Erkennungsraten für den wachen Fahrer anhand seines Fahrverhaltens nicht erhöht werden. Erst durch die Aufnahme der Blick- und Sprachdaten in die Berechnung gelingt es, die wachen Fahrer ebenfalls relativ sicher zu erkennen.

Insgesamt betrachtet kann durch diese Arbeit ein Beitrag zum besseren Verständnis von Müdigkeit geleistet werden. Durch das neue Referenzierungsverfahren ist eine Möglichkeit geschaffen worden, Müdigkeit zuverlässig und ökonomisch subjektiv, und mit etwas mehr Aufwand, objektiv auf gleichem Niveau zu erfassen. Zudem wurde gezeigt, dass sich das Fahrverhalten unter Müdigkeit über Fahrer hinweg angleicht, was sich in der guten Detektionsleistung der müden Fahrer zeigt.

Was diese Arbeit ebenfalls aufzeigt ist, dass die größere Hürde das Erkennen des wachen Fahrers ist. Erst wenn dies zuverlässig gelingt, können Fehlalarme von Assistenzsystemen vermieden werden und so zu einer Erhöhung der Akzeptanz von Müdigkeitswarnsystemen führen. Neue technologische Entwicklungen im Fahrzeug (Blickmessung, Sprachbedienung,...) könnten dazu genutzt werden, einen größeren Datenpool bereitzustellen und dadurch die Erkennung des jeweiligen Fahrerzustands zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. | Einleitung | 18 |
| 2. | Stand der Forschung | 21 |
| 2.1 | Unfallzahlen und Müdigkeit | 21 |
| 2.2 | Assistenzsysteme zur Müdigkeitserkennung | 24 |
| 2.3 | Müdigkeit, Schläfrigkeit und andere ermüdungsähnliche Zustände | 27 |
| 2.4 | Entstehung von Müdigkeit | 32 |
| 2.5 | Verlauf von Müdigkeit | 33 |
| 2.6 | Auswirkung von Müdigkeit | 34 |
| 2.6.1 | Fahrverhalten | 37 |
| 2.7 | Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalyse | 50 |
| 2.8 | Zusammenfassung Müdigkeit und Fahrverhalten | 53 |
| 2.9 | Auswirkung von Müdigkeit auf weitere Verhaltensparameter | 56 |
| 2.9.1 | Blickverhalten | 58 |
| 2.9.2 | Pupillen Unruhe Index (PUI) | 59 |
| 2.9.3 | Sprachverhalten | 60 |
| 2.10 | Müdigkeitsdetektion durch Blick- und Sprachverhaltensanalyse | 62 |
| 2.11 | Zusammenfassung und Fazit zur Auswirkung von Müdigkeit im Fahrzeugkontext | 66 |
| 2.12 | Entwicklung von Fahrerassistenz im Fahrsimulator und Realverkehr | 69 |
| 2.13 | Müdigkeitsreferenzierung | 71 |
| 2.13.1 | Subjektive Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung | 72 |
| 2.13.2 | Objektive Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung | 75 |
| 2.14 | Ableitung der Fragestellungen | 80 |
| 3. | Empirischer Teil | 86 |
| 3.1 | Methodenentwicklung | 86 |
| 3.1.1 | Entwicklung des Referenzierungssystems zur Müdigkeitserfassung: Subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS) | 86 |
| 3.1.1.1 | Subjektives Müdigkeitsreferenzierungssystem | 86 |
| 3.1.1.2 | Objektives Müdigkeitsreferenzierungssystem | 87 |
| 3.2 | Methodik der vier Studien | 89 |
| 3.2.1 | Methode Studie 1: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Fahrsimulator (Autobahn und Landstraße) | 91 |
| 3.2.1.1 | Fahrsimulator | 91 |
| 3.2.1.2 | Simulationssoftware | 92 |
| 3.2.1.3 | Müdigkeitsreferenzierungssystem | 93 |
| 3.2.1.3.1 | Subjektives Müdigkeitsreferenzierungssystem | 93 |
| 3.2.1.3.2 | Objektives Müdigkeitsreferenzierungssystem | 93 |
| 3.2.2 | Sonstiges Versuchsmaterial | 94 |
| 3.2.3 | Simulationsszenario | 94 |
| 3.2.4 | Experimentelles Design | 95 |
| 3.2.5 | Stichprobe | 96 |
| 3.2.6 | Versuchsdurchführung | 97 |
| 3.2.7 | Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung | 98 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.3 | Methode Studie 2: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Realverkehr (Autobahn und Landstraße)..... | 99 |
| 3.3.1 | Versuchsfahrzeug | 99 |
| 3.3.2 | Müdigkeitsreferenzierungssystem..... | 100 |
| 3.3.3 | Sonstiges Versuchsmaterial..... | 100 |
| 3.3.4 | Streckenbeschreibung..... | 100 |
| 3.3.5 | Experimentelles Design..... | 101 |
| 3.3.6 | Stichprobe | 102 |
| 3.3.7 | Versuchsdurchführung | 102 |
| 3.3.8 | Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung | 103 |
| 3.4 | Methode Studie 3: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Realverkehr II (Autobahn) | 105 |
| 3.4.1 | Versuchsfahrzeug | 105 |
| 3.4.2 | Müdigkeitsreferenzierungssystem..... | 105 |
| 3.4.3 | Sonstiges Versuchsmaterial..... | 105 |
| 3.4.4 | Streckenbeschreibung..... | 105 |
| 3.4.5 | Experimentelles Design..... | 106 |
| 3.4.6 | Stichprobe | 106 |
| 3.4.7 | Versuchsdurchführung | 107 |
| 3.4.8 | Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung | 107 |
| 3.5 | Methode Studie 4: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Simulator II (Autobahn) | 107 |
| 3.5.1 | Fahr Simulator/Simulationssoftware | 107 |
| 3.5.2 | Müdigkeitsreferenzierungssystem..... | 107 |
| 3.5.3 | Blickerfassungssystem..... | 108 |
| 3.5.4 | Sonstiges Versuchsmaterial..... | 108 |
| 3.5.5 | Simulationsszenario | 109 |
| 3.5.6 | Experimentelles Design..... | 109 |
| 3.5.7 | Stichprobe | 109 |
| 3.5.8 | Versuchsdurchführung | 110 |
| 3.5.9 | Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung | 110 |
| 3.6 | Zusammenfassender Überblick über die vier Studien | 111 |
| 4. | Ergebnisse | 112 |
| 4.1 | Erfasste Müdigkeitsstufen und Müdigkeitsverlauf..... | 115 |
| 4.1.1 | Studie 1 | 115 |
| 4.1.1.1 | Müdigkeitsstufen | 115 |
| 4.1.1.2 | Müdigkeitsverlauf | 117 |
| 4.1.2 | Studie 2 | 118 |
| 4.1.2.1 | Müdigkeitsstufen | 118 |
| 4.1.2.2 | Müdigkeitsverlauf | 120 |
| 4.1.3 | Studie 3 | 122 |
| 4.1.3.1 | Müdigkeitsstufen | 122 |
| 4.1.3.2 | Müdigkeitsverlauf | 123 |
| 4.1.4 | Studie 4 | 125 |
| 4.1.4.1 | Müdigkeitsstufen | 125 |
| 4.1.4.2 | Müdigkeitsverlauf | 127 |
| 4.2 | Überprüfung der subjektiven und objektiven Braunschweiger Müdigkeitsskala (SOMS) | 127 |
| 4.2.1 | Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren über alle Studien | 128 |
| 4.2.2 | Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für die Realfahrten | 129 |
| 4.2.3 | Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für die Simulatorfahrten | 130 |
| 4.2.4 | Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für Autobahn und Landstraße | 131 |
| 4.2.5 | Diskussion Müdigkeitsreferenzierungssystem | 132 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.3 | Abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens (Autobahn) | 134 |
| 4.3.1 | Substichprobenbeschreibung | 134 |
| 4.3.2 | Erfasste Müdigkeitsstufen | 134 |
| 4.3.3 | Experimentelles Design | 135 |
| 4.3.4 | Ergebnisse Fahrverhalten | 138 |
| 4.3.4.1 | Lenkverhalten | 138 |
| 4.3.4.2 | Spurhaltung | 139 |
| 4.3.4.3 | Time to Line Crossing (TLC) | 142 |
| 4.3.4.4 | Geschwindigkeitsverhalten | 144 |
| 4.3.5 | Diskussion abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens | 147 |
| 4.4 | Unabhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens (Autobahn) | 152 |
| 4.4.1 | Ergebnisse Fahrverhalten | 153 |
| 4.4.1.1 | Lenkverhalten | 153 |
| 4.4.1.2 | Spurhaltung | 154 |
| 4.4.1.3 | Time to Line Crossing (TLC) | 157 |
| 4.4.1.4 | Geschwindigkeitsverhalten | 158 |
| 4.4.2 | Diskussion unabhängige und abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens | 161 |
| 4.5 | Grenzwertableitung und Grenzwertbildung zur Trennung von wachem und müdem Fahrverhalten (reale Autobahn) | 167 |
| 4.6 | Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen (reale Autobahn) | 169 |
| 4.6.1 | Modellerstellung | 171 |
| 4.6.2 | Modellvalidierung | 171 |
| 4.6.2.1 | Modellvalidierung bekannter Datensatz | 172 |
| 4.6.2.2 | Modellvalidierung bekannter und unbekannter Datensatz | 173 |
| 4.6.2.3 | Modellvalidierung unbekannter Datensatz | 174 |
| 4.6.3 | Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen | 175 |
| 4.7 | Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen mit Baseline (reale Autobahn) | 177 |
| 4.7.1 | Modellerstellung mit Baseline | 179 |
| 4.7.2 | Modellvalidierung mit Baseline | 179 |
| 4.7.2.1 | Modellvalidierung bekannter und unbekannter Datensatz mit Baseline | 179 |
| 4.7.2.2 | Modellvalidierung unbekannter Datensatz mit Baseline | 180 |
| 4.7.3 | Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen mit Baseline | 181 |
| 4.8 | Exkurs Landstraße | 183 |
| 4.8.1 | Substichprobenbeschreibung | 184 |
| 4.8.2 | Ergebnisse Fahrverhalten | 184 |
| 4.8.2.1 | Lenkverhalten | 184 |
| 4.8.2.2 | Spurhaltung | 186 |
| 4.8.2.3 | Time to Line Crossing (TLC) | 188 |
| 4.8.2.4 | Geschwindigkeitsverhalten | 189 |
| 4.8.3 | Diskussion Landstraße | 192 |
| 4.9 | Abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens (Fahrsimulator) | 194 |
| 4.9.1 | Ergebnisse Blick- und Pupillenverhalten | 195 |
| 4.9.1.1 | Horizontales Blickverhalten | 195 |
| 4.9.1.2 | Vertikales Blickverhalten | 196 |
| 4.9.1.3 | Pupillengröße | 197 |
| 4.9.2 | Ergebnisse Sprachverhalten | 198 |
| 4.9.3 | Diskussion abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens | 199 |
| 4.10 | Unabhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens (Fahrsimulator) | 200 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4.10.1 | Ergebnisse Blickverhalten | 200 |
| 4.10.1.1 | Horizontales Blickverhalten | 200 |
| 4.10.1.2 | Vertikales Blickverhalten..... | 201 |
| 4.10.1.3 | Pupillengröße..... | 203 |
| 4.10.2 | Ergebnisse Sprachverhalten | 204 |
| 4.10.3 | Diskussion unabhängige und abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens | 205 |
| 4.11 | Müdigkeitsdetektion durch Analyse von Fahr- Blick- und Sprachverhalten (Fahrsimulator) .. | 208 |
| 4.11.1 | Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalyse | 208 |
| 4.11.2 | Müdigkeitsdetektion durch Analyse des Fahrverhaltens sowie des Blick- und Sprachverhaltens | 210 |
| 4.11.3 | Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Analyse des Fahrverhaltens sowie des Blick- und Sprachverhaltens | 213 |
| 5. | Gesamtfazit | 216 |
| 5.1 | Beantwortung der Fragestellungen..... | 218 |
| 6. | Literaturverzeichnis | 227 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 1: Anzahl tödlicher Müdigkeitsunfälle von 1975-2009 in Deutschland. | 22 |
| Abbildung 2: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009). | 28 |
| Abbildung 3: Standardabweichung der Spurhaltung in Contradi et. al. (2004, S. 429). | 39 |
| Abbildung 4: Spurhaltung von gesunden Personen und OSAS-Patienten (Risser et al. 2000, S. 4). | 40 |
| Abbildung 5: TLC-Berechnung für linke und rechte Spurseite (einfache Methode) (Paul, Boyle, Tippin & Rizzo, 2005, S. 19). | 41 |
| Abbildung 6: TLC vor, während und nach einer Mikroschlafepisode (Paul et al., 2005, S. 22). | 42 |
| Abbildung 7: Ellipsenkriterium am Anfang einer Fahrt (links) und am Ende einer Fahrt (rechts) (King et al., 1998, S. 875). | 43 |
| Abbildung 8: Häufigkeiten großer Lenkradbewegungen (Schramm et al., 2009, S. 133). | 45 |
| Abbildung 9: Geschwindigkeitsvariation und Kollisionen nach 4, 8, 18 & 24 Stunden (Baulk et al., 2008, S. 399). | 48 |
| Abbildung 10: Standardabweichung (links) und mittlere Geschwindigkeit (rechts) in Abhängigkeit der Tageszeit und Versuchsbedingung (Lenné, Triggs und Redman, 1998, S. 41). | 49 |
| Abbildung 11: Histogramm für die Lidbewegung im wachen und müden Zustand (Vural et al., 2012). | 65 |
| Abbildung 12: Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (aus Niederl, 2007a, S.98). | 73 |
| Abbildung 13: Samn-Perelli-Sleepiness-Scale (aus Niederl, 2007, S. 96). | 74 |
| Abbildung 14: Stanford Sleepiness Scale (Hoddes et al., 1972). | 74 |
| Abbildung 15: Fremdbewertungsskala nach Wierwille und Ellsworth (1994, S. 573). | 77 |
| Abbildung 16: Müdigkeitsskala zur Erfassung der subjektiven Müdigkeit (in Klammer Skalenwert der Müdigkeit) (Muhrrer & Vollrath, 2010a in Reinprecht et al., 2011b, S. 142). | 87 |
| Abbildung 17: Müdigkeitsskala zur Erfassung der objektiven Müdigkeit (in Klammer Skalenwert der Müdigkeit) (Muhrrer & Vollrath, 2010a in Reinprecht et al., 2011b, S. 142). | 88 |
| Abbildung 18: Fahrsimulator der TU Braunschweig, Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie. | 92 |
| Abbildung 19: Simulierte Autobahnnachtstrecke mit eingeblendeter Müdigkeitsskala. | 94 |
| Abbildung 20: Simulierte Landstraßennachtstrecke mit eingeblendeter Müdigkeitsskala. | 95 |
| Abbildung 21: Versuchsaufbau für die Müdigkeitsfahrten im Realfahrzeug. | 100 |
| Abbildung 22: Realstrecke der Müdigkeitsfahrten in Studie 2 (Autobahn in schwarz, Landstraße in blau). | 101 |
| Abbildung 23: Realstrecke der Müdigkeitsfahrten in Studie 3. | 106 |
| Abbildung 24: Dikablis Blickerfassungssystem bestehend aus Head-Unit & Markern (links), Kalibrierungskreuze im Feld (rechts). | 108 |
| Abbildung 25: Mittlere Müdigkeitswerte für Fremd- und Selbstbewertung. | 117 |
| Abbildung 26: Mittlere Müdigkeitswerte für Fremd- und Selbstbewertung. | 121 |
| Abbildung 27: Mittlere Müdigkeitswerte für Selbst- und Fremdbewertung. | 124 |
| Abbildung 28: Müdigkeitsverlauf für die Selbstbewertung. | 127 |
| Abbildung 29: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit über alle drei Studien mit eingezeichneter Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall. | 128 |
| Abbildung 30: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit für beiden Realfahrtstudien mit eingezeichneter Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall. | 130 |
| Abbildung 31: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit für die erste Simulatorstudie mit eingezeichneter Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall. | 131 |
| Abbildung 32: Standardabweichung und absoluter Lenkradwinkel in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 139 |
| Abbildung 33: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 141 |
| Abbildung 34: Absolute Abweichung vom rechten Rand und prozentuelle Zeit näher 10 cm zum rechten Rand (TDLC) in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 141 |
| Abbildung 35: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 144 |
| Abbildung 36: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 146 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 37: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 146 |
| Abbildung 38: Standardabweichung und absoluter Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 154 |
| Abbildung 39: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 156 |
| Abbildung 40: Absolute Abweichung vom rechten Rand und Zeit in Prozent <10 cm zum rechten Rand (TDL) in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 156 |
| Abbildung 41: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 158 |
| Abbildung 42: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 160 |
| Abbildung 43: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 160 |
| Abbildung 44: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009)..... | 164 |
| Abbildung 45: Standardabweichung und absolut größter Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 185 |
| Abbildung 46: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 187 |
| Abbildung 47: Absolute Abweichung vom rechten Rand und Zeit in Prozent <10 cm zum rechten Rand (TDL) in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 187 |
| Abbildung 48: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 189 |
| Abbildung 49: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 191 |
| Abbildung 50: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 191 |
| Abbildung 51: Mittlere horizontale Augenbewegung und Standardabweichung der horizontalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 196 |
| Abbildung 52: Mittlere vertikale Augenbewegung und Standardabweichung der vertikalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 197 |
| Abbildung 53: Mittlere Pupillengröße und Standardabweichung der Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 198 |
| Abbildung 54: Wortlängendifferenz in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 199 |
| Abbildung 55: Mittlere horizontale Augenbewegung und Standardabweichung der horizontalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 201 |
| Abbildung 56: Mittlere vertikale Augenbewegung und Standardabweichung der vertikalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 202 |
| Abbildung 57: Mittlere Pupillengröße und Standardabweichung der Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 203 |
| Abbildung 58: Wortlängendifferenz in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 204 |
| Abbildung 59: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009)..... | 225 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Anteil der Müdigkeit an Verkehrsunfällen..... | 23 |
| Tabelle 2: Müdigkeit: Ursachen, Symptome, Konsequenzen, Gegenmaßnahmen (ergänzt) (Hargutt, 2003). | 32 |
| Tabelle 3: Veränderungen der Leistungsparameter mit steigender Müdigkeit bzw. Alkoholkonzentration in den unterschiedlichen Leistungstests..... | 36 |
| Tabelle 4: Fahrverhaltensänderungen unter Müdigkeit. | 37 |
| Tabelle 5: Müdigkeitsdetektion im Fahrkontext anhand von Fahrdaten. | 50 |
| Tabelle 6: Fahrverhaltensveränderungen mit zunehmender Müdigkeit bzw. nach Schlafdeprivation oder während eines Mikroschlafereignisses. | 54 |
| Tabelle 7: Verhaltensparameter und ihre Veränderung unter steigender Müdigkeit. | 57 |
| Tabelle 8: Müdigkeitsdetektion anhand von Verhaltensdaten im Fahrzeugkontext. | 63 |
| Tabelle 9: Müdigkeitsdetektion durch verbale Äußerungen (Krajewski, 2007). | 64 |
| Tabelle 10: Aspekte der vier Studien sowie Anzahl an Versuchspersonen und 10-Minutenabschnitten. | 111 |
| Tabelle 11: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt. | 115 |
| Tabelle 12: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson. | 116 |
| Tabelle 13: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt. | 118 |
| Tabelle 14: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson. | 119 |
| Tabelle 15: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt. | 122 |
| Tabelle 16: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson. | 122 |
| Tabelle 17: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt. | 125 |
| Tabelle 18: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson | 126 |
| Tabelle 19: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte für alle drei Studien. | 129 |
| Tabelle 20: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte der beiden Realfahrtstudien. | 130 |
| Tabelle 21: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte der ersten Simulatorstudie. | 131 |
| Tabelle 22: Korrelationen der beiden Müdigkeitsreferenzierungen für Landstraße und Autobahn im Simulator sowie in der Realfahrt. | 132 |
| Tabelle 23: Versuchspersonen aus den jeweiligen Studien und dazugehörige Müdigkeitswerte. | 135 |
| Tabelle 24: Studiendesign und Anzahl der jeweiligen Müdigkeitswerte in den einzelnen Versuchsbedingungen für die abhängige Analyse..... | 136 |
| Tabelle 25: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 138 |
| Tabelle 26: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 140 |
| Tabelle 27: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe..... | 143 |
| Tabelle 28: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 145 |
| Tabelle 29: Studiendesign und Anzahl an Müdigkeitsstufen für die Autobahn in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe..... | 152 |
| Tabelle 30: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 153 |
| Tabelle 31: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 155 |
| Tabelle 32: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe..... | 157 |
| Tabelle 33: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 159 |
| Tabelle 34: Abhängig und unabhängig Veränderung sensitive Fahrparameter für Müdigkeit und Fahrumgebung. | 162 |
| Tabelle 35: Grenzwerte der Fahrdaten für einen wachen Fahrer. | 168 |
| Tabelle 36: Anzahl 10-Minutenabschnitte für die drei Müdigkeitsstufen..... | 169 |
| Tabelle 37: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten. | 170 |
| Tabelle 38: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für drei Müdigkeitsstufen. | 170 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 39: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter Daten..... | 172 |
| Tabelle 40: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst..... | 173 |
| Tabelle 41: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten. | 173 |
| Tabelle 42: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst. | 174 |
| Tabelle 43: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Daten..... | 175 |
| Tabelle 44: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst..... | 175 |
| Tabelle 45: Anzahl 10-Minutenabschnitte für die drei Müdigkeitsstufen. | 177 |
| Tabelle 46: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten mit Baseline..... | 178 |
| Tabelle 47: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für drei Müdigkeitsstufen mit Baseline. .. | 178 |
| Tabelle 48: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannten Daten mit Baseline. | 180 |
| Tabelle 49: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst mit Baseline..... | 180 |
| Tabelle 50: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Datensatz mit Baseline. .. | 181 |
| Tabelle 51: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Datensatz, gelb und rot zusammengefasst mit Baseline. | 181 |
| Tabelle 52: Studiendesign und Verteilung der Müdigkeitswerte in den beiden Studien auf der Landstraße unter Einschränkung der Messqualität. | 183 |
| Tabelle 53: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe. | 185 |
| Tabelle 54: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 186 |
| Tabelle 55: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe. | 188 |
| Tabelle 56: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe..... | 190 |
| Tabelle 57: Studiendesign und Anzahl an vorhandenen Datensätzen je Müdigkeitsstufe. | 194 |
| Tabelle 58: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 195 |
| Tabelle 59: Statistische Kennwerte für das vertikale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 196 |
| Tabelle 60: Statistische Kennwerte für die Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 197 |
| Tabelle 61: Studiendesign und Anzahl an Daten in der jeweiligen Müdigkeitsstufe. | 200 |
| Tabelle 62: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 201 |
| Tabelle 63: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe. | 202 |
| Tabelle 64: Statistische Kennwerte für die Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe..... | 203 |
| Tabelle 65: Gegenüberstellung der Veränderung von Blick- und Sprachparameter in Abhängigkeit der verwendeten Berechnungsmethode. | 205 |
| Tabelle 66: Anzahl 10-Minutenabschnitte je Müdigkeitsstufe. | 208 |
| Tabelle 67: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für Fahrdaten im Fahrsimulator. .. | 209 |
| Tabelle 68: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für die drei Müdigkeitsstufen..... | 209 |
| Tabelle 69: Beobachtet und berechnete Müdigkeitsstufe für die Fahrparameter, gelb und rot zusammengefasst..... | 210 |
| Tabelle 70: Anzahl 10-Minutenabschnitte in der jeweiligen Müdigkeitsstufe. | 211 |
| Tabelle 71: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für Fahr- Blick- und Sprachdaten im Fahrsimulator. | 211 |
| Tabelle 72: Klassifizierungsergebnisse der Fahrdaten gemeinsam mit den Blick- und Sprachdaten für die drei Müdigkeitsstufen. | 212 |
| Tabelle 73: Beobachtet und berechnete Müdigkeitsstufe für Fahrparameter sowie Blick- und Sprachdaten gemeinsam, gelb und rot zusammengefasst. | 212 |

| | |
|--|-----|
| Tabelle 74: Verteilung der Müdigkeitsstufen sowie Darstellung der Verkehrsumgebungen und Straßentypen aller vier Studien. | 218 |
| Tabelle 75: Müdigkeits- und fahrumgebungssensitive Fahrparameter für die Autobahn. | 219 |

1. EINLEITUNG

Verkehrsunfälle zu verhindern und/oder deren Folgen abzuschwächen liegt im Fokus verkehrspsychologischer Forschung. Auch wenn die Unfallzahlen 2011 (Statistisches Bundesamt, 2012b) das erste Mal wieder anstiegen (2010: 3648 vs. 2011: 4009), so lässt sich über die letzten Jahrzehnte ein ständiger Abwärtstrend beobachten (Statistisches Bundesamt, 2012a). Die Statistiken erfassen Unfallbeteiligte, Sach- und Personenschäden, Umgebungsbedingungen, technische Mängel und vieles mehr, so dass es unter anderem möglich ist, Unfallursachen zu erkennen. Daraus ergibt sich eine Datenbasis, aufgrund derer entschieden werden kann in welche Richtung sich Unfallvermeidungsmaßnahmen in Zukunft entwickeln sollten. Es gibt jedoch auch Unfallfaktoren, die nur sehr vage definiert und dokumentiert sind, was es schwierig macht, diese als Unfallursache auch tatsächlich zu identifizieren, um kontrolliert entgegen zu steuern.

Einer dieser Faktoren ist der Fahrerzustand Müdigkeit. Dass Fahrer müde ein Fahrzeug lenken, ist unbestritten. Diese Tatsache belegt ein Zitat von Åkerstedt aus dem Jahr 2000 „Sleepiness is the largest identifiable and preventable cause of accidents in transport operations (between 15 and 20% of all accidents), surpassing that of alcohol or drug related incidents in all modes of transportation“ (Åkerstedt, 2000, p. 395). Andere Autoren (Horne & Reyner, 1995) gehen von müdigkeitsbedingten Unfällen im Bereich von ein bis zehn Prozent der Gesamtunfälle aus.

Ob der Fahrer sich seines Müdigkeitszustandes bewusst ist und das damit verbundene Risiko in Kauf nimmt, oder den eigenen Müdigkeitszustand gar nicht einschätzen kann, ist bis dato noch wenig erforscht. Arbeiten über dieses Thema zeigen aber, dass Fahrer dazu tendieren, den eigenen Müdigkeitszustand nicht richtig einzuschätzen (Schmidt, 2009). In zahlreichen Forschungsarbeiten ist dokumentiert, dass Müdigkeit die Fahrer in Ihrer Fähigkeit, ein Fahrzeug sicher zu lenken, beeinflusst (Åkerstedt, Keckelund, Gillberg, Lowden, & Axelsson, 2000; Krajewski, Sommer, Trutschel, Edwards, & Golz, 2009; May & Baldwin, 2009; Schmidt, 2010). In den bisherigen Forschungsergebnissen finden sich jedoch Diskrepanzen zwischen den einzelnen Studien hinsichtlich der Auswirkung von Müdigkeit auf das Fahrverhalten.

Das Wissen über die konkreten Auswirkungen von Müdigkeit auf den Fahrer bzw. über unterschiedliche Fahrer hinweg könnte dabei helfen, Fahrermüdigkeit über technische Systeme im Fahrzeug zu erfassen und den Fahrer auf seinen Zustand aufmerksam zu machen. Allerdings steht man hierbei vor einem Berg an Herausforderungen, die mitunter dem Phänomen Müdigkeit anzulasten sind. Müdigkeit zeigt sich in Ihrem Verlauf inter- und intraindividuell sehr uneinheitlich. Konstitution, Gewohnheit, generelles Fahrverhalten, Straßentyp, all das kann das Verhalten der Fahrer unter Müdigkeit stark beeinflussen. Die heutigen Systeme werden dem intraindividuellen Unterschieden gerecht (Galley, 2005), indem sie mit einer Baselinephase arbeiten, die den „typischen“ wachen Fahrer repräsentieren soll und verwenden diese als Referenzwert. Diese Methode ist allerdings mit einigen Einbußen verbunden, die im Theorieteil näher erläutert werden. Um diesen Nachteilen zu begegnen, soll die Frage behandelt werden, ob es auch ein individuell unabhängiges Müdigkeitsver-

halten gibt, welches ohne Baselinephase eine Erkennung des Müdigkeitszustandes erlaubt.

Des Weiteren ist es hier besonders relevant, den Fahrer unter „natürlichen“ Verkehrsbedingungen zu testen, was mit aufwändigen Versuchsreihen und einem bestimmten Unfallrisiko verbunden ist. Der Validitätsfrage bzw. der Vergleich zwischen Labor- und Feldsetting in unterschiedlichen Fahrumgebungen (Autobahn und Landstraße) soll in dieser Arbeit ebenfalls nachgegangen werden.

Ist man soweit, dass man Müdigkeit im Fahrzeug tatsächlich reliabel und valide messen und dementsprechend über ein System rückmelden kann, kommt wiederum der Faktor „Fahrer“ hinzu, der der Wirksamkeit des Systems einen Strich durch die Rechnung machen könnte. Fahrer können sofort prüfen, ob der rückgemeldete Zustand auch der ist, den sie selbst empfinden. Stimmt diese Rückmeldung mit dem empfundenen Zustand nicht überein, wird sich die Akzeptanz verringern. Es geht also - anders als bei der Rückmeldung über Geschwindigkeit, Abstand oder Spurhaltung - um einen Abgleich mit einem subjektiven Empfinden und nicht mit objektiven „Hard Facts“. Hinzu kommt, dass die heutigen Systeme nur informieren bzw. warnen. Ob der Fahrer dieser Aufforderung Folge leistet, ist wieder eine andere Sache, die nicht mehr im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden wird.

Fokus dieser Arbeit ist es, ein umfassendes Bild über den Einfluss von Müdigkeit auf das Verhalten der Fahrer zu schaffen, Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchssettings zu erarbeiten und daraus folgernd eine reale Basis für die Entwicklung einer Müdigkeitsdetektion im Fahrzeug zu bilden.

Um dieses Bild zu generieren wird im Theorieteil der Arbeit Müdigkeit in ihren unterschiedlichen Facetten dargestellt. Hierbei werden zuerst die Unfallzahlen berichtet, die im Zusammenhang mit Müdigkeit stehen. Im nächsten Schritt werden bereits bestehende Möglichkeiten zur Müdigkeitserkennung im Fahrzeug durch Assistenzsysteme aufgezeigt. Im Anschluss daran werden die unterschiedlichen Begrifflichkeiten Müdigkeit, Schläfrigkeit und ermüdungsähnliche Zustände beschrieben und in einem weiteren Schritt integriert um diese danach in ein Müdigkeitsmodell einzuordnen.

Nach dieser Einordnung werden die Entstehung, der Verlauf und die Auswirkungen von Müdigkeit diskutiert und auf das Fahrverhalten übertragen. Im nachfolgenden Kapitel werden weitere Möglichkeiten der Müdigkeitsdetektion anhand von Blick-, Pupillen- und Sprachdaten beschrieben und diskutiert. Nach einer Betrachtung über die Gefährlichkeit von Müdigkeit im Straßenverkehr werden die Vor- und Nachteile einer Assistenzsystementwicklung im Simulator bzw. im realen Verkehrsgeschehen besprochen. Anschließend wird auf die Problematik der Müdigkeitsreferenzierung eingegangen, wobei hier der Fokus auf die Selbst- und Fremdbewertungsverfahren liegt. Anhand der im Theorieteil aufgezeigten Problem und dem daraus resultierenden Forschungsbedarf werden die Fragestellungen für vorliegende Arbeit abgeleitet.

Der empirische Teil beginnt mit der Methodenentwicklung, in der die neuentwickelte Müdigkeitsreferenzierungsmethode vorgestellt wird. Ausgehend von den abgeleiteten Fragestellungen wurden vier unterschiedliche Studien durchgeführt.

Studie 1 hatte das Ziel im Simulator eine Grundlage über das Fahrverhalten unter Müdigkeitseinfluss in einer kontrollierten Umgebung zu schaffen. Zudem wurden zwei unterschiedliche Straßentypen (Autobahn und Landstraße) verwendet.

Da auch der Einfluss von unterschiedlichen Versuchssettings (Real vs. Simulation) beleuchtet werden soll, wurde in Studie 2 eine reale Verkehrsumgebung für den Versuch herangezogen. Diese bestand zum Zwecke des Vergleichs ebenfalls wieder, aus den beiden Straßentypen Autobahn und Landstraße. Das Ziel war es das Fahrverhalten unter Müdigkeitseinfluss in der Realität zu untersuchen.

In Studie 2 war aufgrund von unzähligen Datenausfällen auf der Landstraße die Datenbasis für eine sinnvolle Auswertung jedoch sehr gering. Zudem kamen hohe Müdigkeitsgrade bei den Fahrern so gut wie kaum vor, was die Datenbasis weiter verringerte.

Aus diesem Grund wurde eine zweite Studie (Studie 3) im Realverkehr konzipiert, wobei hier nur noch der Straßentyp Autobahn verwendet wurde. Durch dieses Vorgehen war es möglich, eine größere Datenmenge mit validen Messwerten sowie höheren Müdigkeitsgraden bei den Fahrern zu erhalten.

Da durch die bereits beschriebenen Studien erkannt wurde, dass eine Müdigkeitserkennung anhand von Fahrdaten als kritisch zu bewerten ist, wurde eine zweite Simulatorstudie (Studie 4) auf dem Straßentyp Autobahn durchgeführt. Diese hatte das Ziel, zusätzlich zu den Fahrdaten, Blick- und Sprachdaten auf mögliche Unterschiede und Erkennungsraten in Abhängigkeit von Müdigkeit hin zu untersuchen. .

2. STAND DER FORSCHUNG

In diesem Abschnitt wird der theoretische Hintergrund der Arbeit in Bezug auf Müdigkeit dargestellt. Es werden Unfallzahlen sowie unterschiedliche Aspekte von Müdigkeit thematisiert und der daraus resultierende offene Forschungsbedarf im Hinblick auf die Erkennung von Müdigkeit im Fahrzeugkontext aufgezeigt.

2.1 Unfallzahlen und Müdigkeit

Im Gegensatz zu Unfällen, die z.B. durch Alkohol entstehen und bei denen man mittels Blutalkoholkonzentration die Höhe des Alkohols objektiv durch Tests nachweisen kann, fehlt für die Müdigkeit bis dato ein derartiges Nachweisverfahren. Zwar gibt es in einzelnen Ländern bereits die Kategorie „Übermüdung“, „Müdigkeit“, „Fatigue“ bzw. „Drowsiness“ als Unfallursache (vgl. Statistisches Bundesamt, 2012b), die Beweisführung seitens der Polizei ist jedoch schwierig. In Großbritannien sowie auch in den USA hat man einige Indikatoren eingeführt, die die Erkennung eines müdigkeitsbedingten Unfalls durch die Polizei erleichtern sollen. Folgende Merkmale kennzeichnen einen Müdigkeitsunfall in Großbritannien:

- The vehicle has run off the road and/or collided with another vehicle or object
- There is an absence of skid marks or braking
- The driver could see the point of run-off or the object hit prior to the crash
- Other causes are eliminated e.g. mechanical defect, speeding, excess alcohol, bad weather; and
- Witnesses may report lane drifting prior to the crash (Horne & Reyner, 1995, 1999) (SafetyNet, 2009, S. 16f)

In den USA erstellte ein Expertenteam (NCSDR/NHTSA, 2001) ebenfalls eine Liste von Indikatoren, die zur Erkennung von Müdigkeitsunfällen herangezogen werden können:

- The problem occurs during late night/early morning or mid-afternoon
- The crash is likely to be serious
- A single vehicle leaves the roadway
- The crash occurs on a high-speed road
- The driver does not attempt to avoid a crash
- The driver is alone in the vehicle (SafetyNet, 2009, S. 17)

Um einen Unfall als Müdigkeitsunfall zu deklarieren, müssen nicht sämtliche angeführte Punkte erfüllt sein. Wie sich zeigt, kann man grundsätzlich von einem Müdigkeitsunfall ausgehen, wenn das Fahrzeug ohne ersichtliche Gegenmaßnahme entweder von der Straße abkommt oder mit einem anderen Hindernis kollidiert. Zudem wird ein derartiger Unfall dadurch begünstigt, dass er entweder spät nachts, früh morgens oder im Nachmittagstief stattfindet und der Fahrer mit Geschwindigkeiten

größer 50 km/h unterwegs ist. Dies weist darauf hin, dass derartige Unfälle vermehrt außerhalb von Ortschaften zu finden sind.

Zudem zeigt sich, dass Müdigkeitsunfälle meist Alleinunfälle sind. Dies könnte die Rolle des Beifahrers bei müden Fahrern bedeutsam machen. Die Relevanz von Beifahrern zeigt sich auch in einer Untersuchung von Keall, Frith und Patterson (2004). Sie beschreiben einen protektiven Faktor von Beifahrern auf die Unfallentstehung, die Autoren diskutieren dies jedoch nicht im Zusammenhang mit Müdigkeit. Auch Lee und Abdel-Aty (2008) schreiben Beifahrern protektive Faktoren zu. Sie fanden jedoch auch negative Einflüsse von Beifahrern, vor allem bei jungen Fahrern, sofern die Mitfahrer im gleichen Altersbereich lagen wie die Fahrer. Hier zeigt sich sogar eine Erhöhung des Unfallpotentials. Ähnliche Gefahren sieht auch der Deutsche Automobilclub (ADAC), der vor möglichen negativen Auswirkungen von schlafenden Beifahrern warnt (Ksta, 2010). So erhöhen schlafende Beifahrer die Wahrscheinlichkeit als Fahrer selbst am Steuer einzuschlafen. Allerdings fehlen bis lang Studien welche konkret die genauen Auswirkungen von Beifahrern auf die Müdigkeit von Fahrern untersuchen (Ksta, 2010).

Wie allerdings einleitend bereits erwähnt, sind Unfallzahlen immer mit Vorsicht zu interpretieren, da ein tatsächlicher Müdigkeitsunfall nur schwer zu erkennen ist. Auch in Deutschland wurde zwar vor einigen Jahrzehnten die Kategorie „Übermüdung“ als Fehlverhalten von Kraftfahrzeugfahrern als Unfallursache aufgenommen. Es findet sich in den Unfallstatistiken allerdings kein Hinweis darüber, wie Müdigkeitsunfälle erkannt werden können.

Nachdem aufgezeigt wurde, dass Unfälle die durch Müdigkeit entstehen nur schwer zu erkennen sind, soll als nächster ein Blick in die offiziellen Unfallstatistiken Aufklärung darüber bringen, wie viele Unfälle trotz dieser Problematiken als durch Müdigkeit am Steuer verursacht deklariert werden

Der zeitliche Verlauf an tödlichen Müdigkeitsunfällen von 1975 bis 2011 zeigt einen abwärtsgerichteten Trend über die letzten vier Jahrzehnte (Abbildung 1) hinweg.

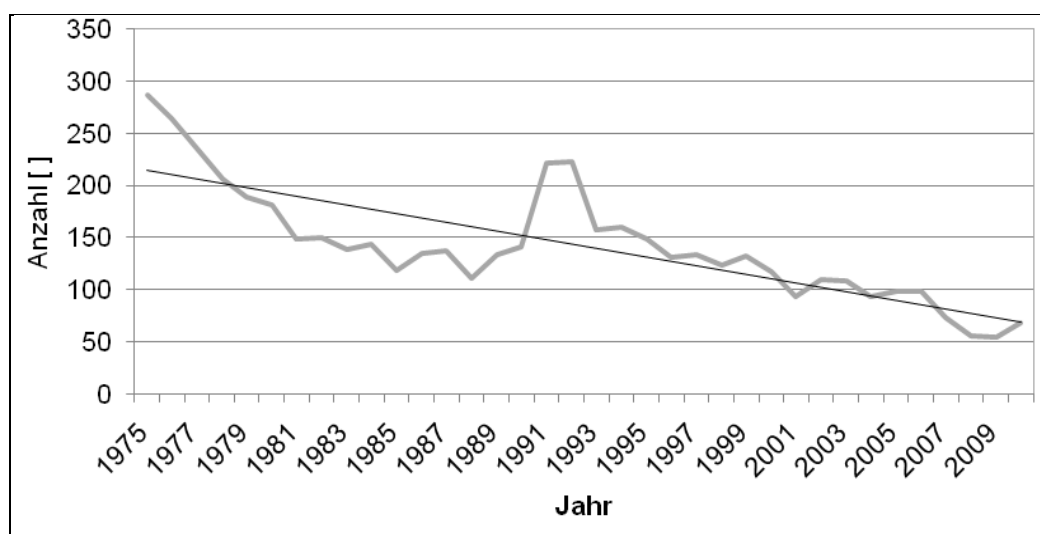


Abbildung 1: Anzahl tödlicher Müdigkeitsunfälle von 1975-2009 in Deutschland.

Betrachtet man die Zahl an Müdigkeitsunfällen für das Jahr 2011 in der amtlichen Statistik, so zeigt sich, dass knapp 1% der Unfälle mit tödlichem Ausgang auf Über-

müdung des Fahrers zurückzuführen ist (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2012). Auch die Zahlen für das gesamte Jahr 2010 (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2011b) weisen Übermüdung nur zu einem Prozentsatz von 1.12 % (58 Getötete) als Ursache an den tödlichen Unfällen aus. Die Zahlen zeigen, dass es ein sehr geringer Anteil an Unfällen ist, der durch Müdigkeit verursacht wird. Hier müsste man die Frage stellen, ob die geringe Zahl durch die zuvor diskutierten Umstände zustande kommt, vor allem wenn man dazu die Zahlen in der einschlägigen Forschungsliteratur betrachtet.

Dort zeigt sich, dass Unfälle, in denen Müdigkeit in irgendeiner Form ursächlich beteiligt ist, bis zu 40% betragen (Tabelle 1). Betrachtet man nur die Unfälle mit tödlichem Ausgang, so ergibt sich immer noch eine relativ hohe Zahl von bis zu 30 % (Tabelle 1) der Unfälle, die durch Müdigkeit verursacht ist.

Tabelle 1: Anteil der Müdigkeit an Verkehrsunfällen.

| Unfallcharakteristik | Müdigkeitsbedingter Anteil | Quellen |
|--|----------------------------|--|
| Verkehrsunfälle | bis 40% | Fell (1994) Garbarino, Nobili, Beelke, Phy und Ferrillo (2001) MacLean, Davies und Thiele (2003) Radun und Summala (2004) |
| Verkehrsunfälle mit Personenschaden | bis 30% | Sagberg (1999) |
| Tödliche Verkehrsunfälle | bis 15% | Åkerstedt, Kecklund und Hörte (2001) Summala und Mikkola (1994) |
| Tödliche Verkehrsunfälle auf Landstraßen | bis 30% | Fell (1994) Ewert (2003) |
| Tödliche Verkehrsunfälle auf Autobahnen | bis 25% | Zulley, Crönlein, Hell und Langwieder (1995) |

Ähnliche Zahlen zu Müdigkeitsunfällen finden sich auch in weiteren Untersuchungen wieder. So benennen Horne und Reyner (1995) zwischen 16 % und 23 %, Hell und Langwieder (2001) rund 24 % und Haworth, Heffernan und Horne (1989) 19.9 % Müdigkeitsunfälle. Philip, Vervialle, Breton, Taillard und Horne (2001) schreiben in einem Überblick über Unfallstatistiken in Frankreich von ca. 10 % Müdigkeitsunfällen. Erschreckend ist in dieser Studie die Tatsache, dass von den Müdigkeitsunfällen, die zwischen 20 Uhr und 7 Uhr geschehen, rund 38 % (Philip et al., 2001) tödlich enden. Eine ähnliche Zahl zeigt sich auch in der Verteilung der tödlichen Unfälle hinsichtlich der Lichtverhältnisse. Teilt man den Tag nach Lichtverhältnissen auf (Tageslicht vs. Dämmerung/Dunkelheit) so ergibt sich ein Anteil von 38.4 % an tödlichen Verkehrsunfällen während der Dämmerung/Dunkelheit (Reinprecht, Muhrer & Vollrath, 2011b). Vergleicht man beide Zahlen, so zeigt sich, dass sich der Anteil an Müdigkeitsunfällen mit jenen Unfällen, die bei Dunkelheit geschehen, sehr gut deckt. Allerdings wäre der Rückschluss, dass Müdigkeitsunfälle im Straßenverkehr nur bei Dämmerung bzw. Dunkelheit stattfinden falsch. Allerdings kann weniger Licht durchaus einen Einfluss auf den Müdigkeitszustand haben. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass bei geringerem Lichteinfall in das Auge die Produktion von Melatonin nicht mehr im gleichem Maße gehemmt (Zulley & Kautzmann, 2005) wird wie bei hellem Sonnenlicht, und dadurch vermehrt Müdigkeit auftreten kann. Man kann allerdings

nicht eindeutig feststellen, welche zusätzlichen Parameter die Unfälle noch begünstigen. Allein schon die Tatsache, dass diese Lichtverhältnisse oft auch mit einer fortgeschrittenen Tageszeit und demzufolge längeren Wachzeiten der Personen verbunden sind, erhöht die Wahrscheinlichkeit für die Unfallentstehung (Philip et al., 2001).

Eine genaue Aufteilung der Müdigkeitsunfälle und den korrespondierenden Lichtverhältnissen ist daher aus den amtlichen statistischen Unfallzahlen nicht möglich.

Interessant ist auch ein Vergleich von Alkohol und Müdigkeitsunfällen. Bei Müdigkeitsunfällen ist das Risiko zu sterben doppelt so hoch wie bei einem Alkoholunfall. Ist Alkohol die Unfallursache kommen ca. 2.2 %, bei Müdigkeitsunfällen ca. 4.4 % ums Leben (Reinprecht, 2012).

Die größere Anzahl an Verkehrstoten durch Müdigkeitsunfälle begründet sich durch die Tatsache, dass diese Unfälle vorwiegend außerhalb von geschlossenen Ortschaften (Außerorts 71.5 %, Innerorts 28.5 %) geschehen, und damit Geschwindigkeiten über 50 km/h angenommen werden können (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2012). Betrachtet man die relativen Zahlen an Getöteten außerhalb von geschlossenen Ortschaften im Vergleich zu innerorts, so liegt der Anteil bei 85 % vs. 15 % (Reinprecht, 2012).

Ein weiterer möglicher Grund für die hohe Sterblichkeit ist, dass bei Müdigkeitsunfällen keine Abwehrreaktionen (z.B. bremsen, lenken, oder ähnliches) durch den Fahrer gezeigt werden und dieser so ungehindert auf ein Hindernis aufprallt oder von der Fahrbahn abkommt (NCSDR/NHTSA, 2001; SafetyNet, 2009).

Zusammenfassend kann postuliert werden, dass Müdigkeitsunfälle meist mit schwerwiegenden Folgen einhergehen (vgl. Manstetten, 2008) und darüber hinaus auch schwer festzustellen sind (SafetyNet, 2009). Durch die Problematik, nicht sicher feststellen zu können, ob ein Unfall auf Übermüdung/Müdigkeit zurück zu führen ist, kann man davon ausgehen, dass die Zahlen aus der amtlichen Statistik Müdigkeit als Unfallursache deutlich unterschätzen (vgl. Åkerstedt, 2000; Schmidt, 2010).

Wie in diesem Abschnitt aufgezeigt wurde, ist Müdigkeit für eine Vielzahl an Unfällen und getöteten Personen im Straßenverkehr verantwortlich. Die Unterschätzung in der amtlichen Statistik ist auf die schwere Erkennbarkeit eines Müdigkeitsunfalls zurück zu führen (SafetyNet, 2009). Demgegenüber stehen die in der einschlägigen Fachliteratur hohen Zahlen an Müdigkeitsunfällen.

Um diese Unfallzahlen im besten Falle weiter zu senken, bzw. auf diesem Niveau zu halten, werden seitens der Automobilindustrie Assistenzsysteme zur Müdigkeitserkennung in Fahrzeuge implementiert. Diese sollen den Fahrer auf seinen Müdigkeitszustand hinweisen und dadurch entsprechend zur Unfallprävention beitragen. Im nachfolgenden Kapitel wird ein Überblick über Assistenzsysteme gegeben, wobei der Hauptfokus auf Müdigkeitssysteme gelegt wird.

2.2 Assistenzsysteme zur Müdigkeitserkennung

Bevor auf die speziellen Assistenzsysteme für Müdigkeitsdetektion eingegangen wird, soll vorab ein kurzer allgemeiner Überblick über Assistenzsysteme gegeben werden.

Grundsätzlich werden Assistenzsysteme nach verschiedenen Gesichtspunkten differenziert (Reichart & Haller, 1995; Wallentowitz & Neunzig, 2005; Weilkes, 2000). Eine mögliche Einteilung bezieht sich auf eine Unterteilung in

- (1) Assistenzebene
- (2) Assistenzstrategie und
- (3) Assistenzkonzept (Wiltschko, 2004; Zambou, 2005).

(1) Die Assistenzebene bezieht sich hierbei auf die Ebenen der Fahraufgabe, auf der das entsprechende Assistenzsystem den Fahrer unterstützen soll (Stabilisierungs-, Führungs- & Navigationsebene (vgl. Donges, 1978)).

(2) Die Assistenzstrategie bezieht sich hierbei auf jenen Teil der Fahraufgabe, der durch ein Assistenzsystem übernommen wird und entspricht somit dem Grad der Automatisierung. Somit ist hier vorrangig die „Aufgabenteilung“ zwischen Fahrer und Assistenzsystem zu verstehen. Neben der Aufgabenteilung zwischen Fahrer und Assistenzsystem lässt sich noch eine weitere Unterteilung bezüglich der Art der Unterstützung durchführen. Hierbei kann zwischen Fahrer- (informierenden und warnenden) und Fahrerassistenzsystemen (unterstützenden und übernehmenden) differenziert werden (Wiltschko, 2004). Bei informierenden Systemen handelt es sich um Systeme, welche dem Fahrer nur Informationen über einen bestimmten Zustand (z.B. Tankfüllstand) liefern und für unkritische Situationen konzipiert sind. Warnungen kommen zum Einsatz, wenn eine Gefahr droht. So wird z.B. durch einen Spurverlassenswarner dem Fahrer eine Überschreitung der Spurmarkierung gemeldet und damit gleichzeitig eine Handlungsaufforderung gesetzt - nämlich das Fahrzeug wieder in die Spur zu lenken. Beide Systeme werden als Fahrerassistenzsystem bezeichnet. Der Gruppe der Fahrerassistenzsysteme sind jene zuzuordnen, die auf die Fahrdynamik des Fahrzeugs wirken. So greifen unterstützende Systeme (z.B. ESP, ABS) auf die Längs- bzw. Querregulation im Fahrzeug ein, indem sie die Stabilität des Fahrzeuges wieder herstellen. Dem Mensch bleibt aber bei den unterstützenden Systemen immer noch die Möglichkeit in das Fahrgeschehen einzugreifen. Diese Möglichkeit ist beim höchsten Grad der Unterstützung nicht mehr gegeben. Hier übernimmt das System die gesamte Steuerung und „übergeht“ somit den Mensch als „Stellorgan“ für die Fahrzeugdynamik.

(3) Das Assistenzkonzept stellt die dritte Einteilung für Assistenzsysteme dar. Hierbei geht es vor allem darum, wie das Assistenzsystem die notwendigen Informationen erhält. Dies kann entweder fahrzeugautonom (es werden nur Daten verwendet, die aus dem eigenen Fahrzeug kommen), kooperativ (Austausch von Daten mit anderen Fahrzeugen) oder infrastrukturgestützt (Austausch von Daten mit zentralen Informationsmanagement) sein.

Wie sich hier zeigt, gibt es unterschiedliche Ebenen, Strategien und Konzepte, auf denen Assistenzsysteme angesiedelt sein können. Im Hinblick auf Müdigkeitssysteme beschränken sich die heutigen Systeme darauf, dem Fahrer eine Information über seinen Müdigkeitszustand zu geben. Ein weiterer Eingriff in die Fahraufgabe (z.B. Abbremsung des Fahrzeuges oder autonomes Anhalten) bei hoher Fahrerermüdigkeit würde nach einer Studie von Muhrer, Reinprecht, Schröder und Vollrath (2010), von Fahrern - verständlicherweise – (noch) nicht akzeptiert werden. Wie die-

ser Fahrerzustand durch das System erstellt/erkannt wird, wird nachfolgend kurz skizziert.

Je nach Fahrzeughersteller werden verschiedene Parameter des Fahrverhaltens für die Detektion von Müdigkeit eingesetzt. Der „Attention Assist“ (Daimler, 2009) von Mercedes-Benz erstellt in den ersten 15 bis 20 Minuten der Fahrt ein „Fahrprofil“ (Baseline) des Fahrers und vergleicht dieses Profil dann in späterer Folge während der Fahrt mit dem aktuellen Profil des Fahrers. Laut Daimler werden für die Berechnung des Müdigkeitszustandes des Fahrers mehr als 70 Parameter wie z.B. Fahrzeit (Time-on-Task), Lenkruhephasen, starke Lenkkorrekturen, Bedieneingabe, usw. herangezogen. Nach dem Prinzip der Erkennung der Müdigkeit anhand des Lenkverhaltens arbeitet auch der Müdigkeitsassistent bei VW (Volkswagen AG Group Research, 2011).

Allen gemein ist, dass sie auf dem Prinzip einer Baselinegenerierung arbeiten und diese dann mit dem aktuellen Fahrprofil vergleichen (vgl. Galley, Hentschel & Kuhn, 2005; Manstetten, 2008). Diese „Anlernphase“ des Assistenzsystems stellt auch einen der größten Schwachpunkte der Systeme dar. Wie schon beschrieben wird in den ersten 15 bis 20 Minuten das Fahrprofil des Fahrers erstellt und dann mit einem späteren Fahrprofil verglichen. Dabei wird immer davon ausgegangen, dass sich zum Zeitpunkt der Fahrprofilerstellung der Fahrer in einem vollständig wachen Zustand befand. Berücksichtigt man die unzähligen Studien zu Müdigkeit (z.B. Hell und Langwieder, 2001; Philip et al., 2001) so zeigt sich, dass die Menge der Fahrer, die in einem absolut wachen Zustand eine Fahrt beginnen, sehr gering ist. Demnach werden in vielen Fällen Referenzwerte verwendet, die eigentlich keinen wachen Fahrer repräsentieren. Das Feedback dieser im Fahrzeug verbauten Systeme erfolgt in der Regel über eine visuelle Rückmeldung im Kombiinstrument bzw. über ein akustisches Signal.

Neben den Systemen welche die Fahrdynamik als Grundlage für die Müdigkeitserkennung des Fahrers verwenden, besteht auch die Möglichkeit über andere Verhaltensdaten (z.B. Lidbewegung, Augenbewegung, Sprachverhalten, usw.) Müdigkeit zu detektieren.

Derartige Systeme wie z.B. das PERCLOS-System (Dinges et al., 1998) verwenden den Öffnungsgrad des Augenlids. Hierbei berechnet das System in einem Zeitintervall von einer bis drei Minuten wie oft die Pupille zu mehr als 80 % vom Augenlid verschlossen ist. Wird ein gewisser Wert innerhalb des vorgegebenen Zeitintervalls überschritten, erfolgt eine Warnung durch das System. Eingesetzt wird das Verfahren im Produkt „DD850 Driver Fatigue Monitor“ (Highway Safety Group, 2010) als mobiles Gerät zur Müdigkeitsdetektion des Fahrers. Eine Anlernphase wie bei den im Fahrzeug fest installierten Assistenzsystemen ist hier nicht vorgesehen und auch nicht notwendig. Das Feedback durch das System erfolgt auf dem visuellen und auditiven Kanal wobei die Ausgabe direkt am Gerät selbst erfolgt. Ein Problem dieses Systems ist, dass die Verwendung im asiatischen Raum nicht möglich ist. Dies liegt daran, dass die vorhandene Technik nicht in der Lage ist den normalen Augenöffnungswinkel der Personen von der 80 %igen Abdeckung der Pupillen zu unterscheiden (Galley, 2011). Ein weiteres System ist das „No-Nap“ System (Global Infotech Pune). Hierbei setzt der Fahrer eine Art „Wireless-Head-Set“ auf. Eine Warnung erfolgt, wenn sich der Kopf um mehr als 15° bis 20° neigt. Hier wird nur ein akustischer

Warnton abgegeben. Für eine weitere Auflistung von Müdigkeitswarnern wie. z.B. dem „Deadman Switch“ oder ähnliche Systeme wird auf May und Baldwin (2009), Golz, Sommer, Trutschel, Sirois und Edwards (2010) und Wriarth, Stone, Horberry und Reed (2007) verwiesen.

Wie sich in dieser Auflistung zeigt sind einige der Systeme relativ gut geeignet um als Müdigkeitserkennungssystem im Fahrzeug eingesetzt zu werden (z.B. „Attention Assist“), andere auf Grund ihrer Anwendungsschwierigkeit wiederum kaum (z.B. „Deadman Switch“).

Allen gemein ist, dass sie meist erst dann warnen, wenn sich der Fahrer schon auf einem sehr hohen Niveau der Müdigkeit befindet. So ist z.B. das Wegnicken des Kopfes (vgl. Wierwille & Ellsworth, 1994) ein guter Indikator für einen Sekunden-schlaf und somit für eine hohe Müdigkeit. Eine späte Warnung zu diesem Zeitpunkt lässt den Fahrer jedoch nahezu keine Zeit mehr um eine angemessene Reaktion (z.B. lenken bzw. bremsen) durchzuführen. Zudem könnte eine falsch konfigurierte Warnung womöglich zu einer Überreaktion des Fahrers führen (z.B. heftige Lenkbe-wegung durch Erschrecken aufgrund eines Warntons).

Wie sich bei der Betrachtung der Assistenzsysteme bereits zeigt, sind viele unter-schiedliche Indikatoren für Müdigkeit vorhanden (z.B. Lidschluss, Lenkverhalten, Kopfbewegung, usw.). Um ein besseres Verständnis über die grundlegenden Verän-derungen durch Müdigkeit zu erhalten, wird das Phänomen Müdigkeit im nächsten Kapitel grundsätzlich beschrieben. In weiterer Folge werden dann die unterschiedli-chen Auswirkungen von Müdigkeit im Kontext der Fahraufgabe berichtet.

2.3 Müdigkeit, Schläfrigkeit und andere ermüdungsähnliche Zustände

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Begrifflichkeiten für Müdigkeit, Schläfrigkeit und andere ermüdungsähnliche Zustände beschrieben.

Fatigue is regarded as a major contributor to workplace and highway morbidity and mortality“ (Noy et al., 2011, S. 495).

„Sleepiness is the largest identifiable and preventable cause of accidents in transport operations (between 15 and 20% of all accidents), surpassing that of alco-hol or drug related incidents in all modes of transportation“ (Åkerstedt, Kecklund, Gillberg, Lowden & Axelsson, 2000, S. 252).

Mit diesen Aussagen zeigen die Autoren die Wichtigkeit auf, sich mit dem Thema Müdigkeit/Schläfrigkeit zu beschäftigen. Viele Unfälle, nicht nur im Straßenverkehr, sondern auch bei Arbeitstätigkeiten sind auf Müdigkeit bzw. Schläfrigkeit zurückzu-führen. So ist die Katastrophe von Tschernobyl oder das Tankerunglück der Exxon Valdez auf Schläfrigkeit bzw. Müdigkeit der diensthabenden Personen zurück zufüh-ren (vgl. Krajewski, 2007).

Wie sich aus den beiden Zitaten allerdings auch zeigt, werden die Begriffe Müdig-keit (im englischen Fatigue) sowie Schläfrigkeit (im englischen Sleepi-ness/Drowsiness) oft synonym verwendet.

Will man Assistenzsysteme gegen Müdigkeit/Schläfrigkeit entwickeln, ist es sinn-voll, diese Begrifflichkeiten zu trennen. Zwar ist die Konsequenz, das Einschlafen am

Steuer bei beiden gleich, der „Weg“ dorthin kann sich jedoch unterscheiden. Um einen ersten Überblick über die Terminologie zu geben, sind die einzelnen Begriffe in Abbildung 2 differenziert dargestellt, und werden danach näher erläutert.

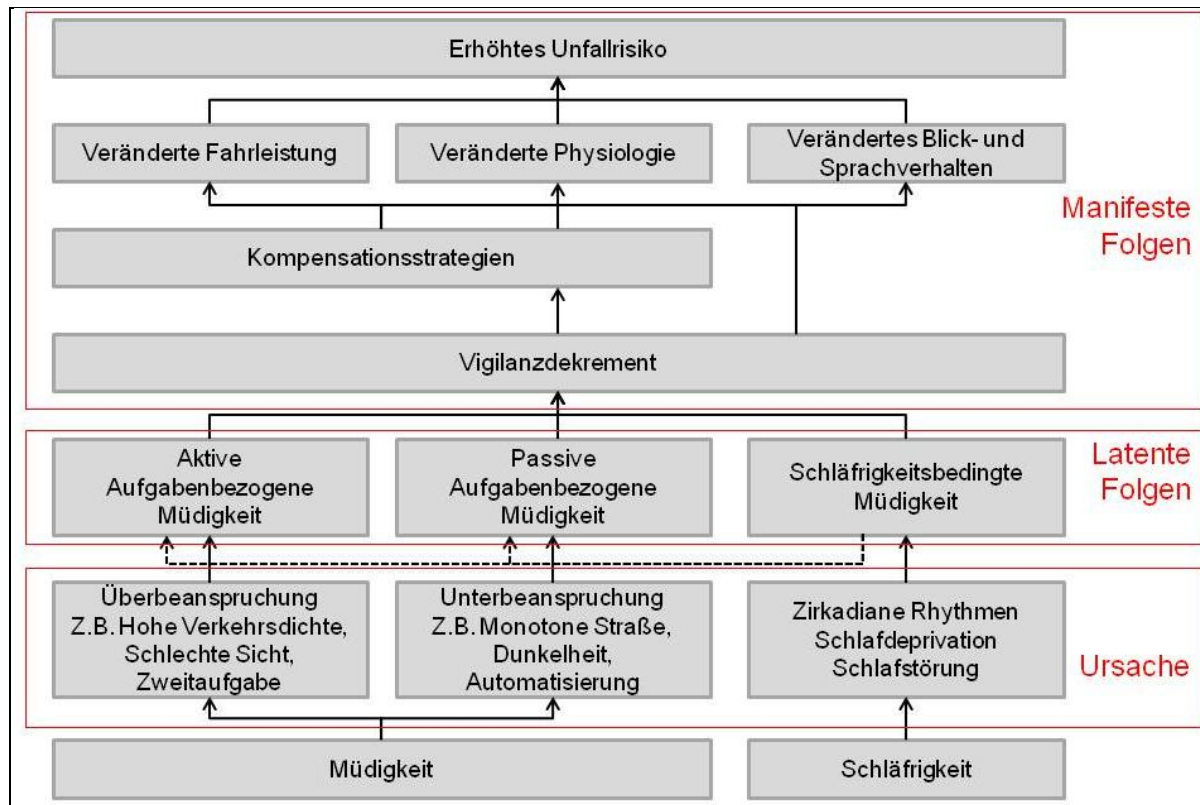


Abbildung 2: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009).

Der Begriff der Schläfrigkeit wird als ein Zustand beschrieben, indem die betroffene Person einen Schlafdrang verspürt (Zulley, Crönlein, Hell, & Langwieder, 1995). Schläfrigkeit wird unter anderem durch den zirkadianen Rhythmus gesteuert (Chipman & Jin, 2009; Zulley et al., 1995). Dieser legt den Tagesrhythmus eines Menschen fest und orientiert sich dabei am 24-Stunden-Rhythmus. Pro Tag durchläuft jede Person zwei zirkadiane Tiefpunkte (Monk & Folkard, 1996). Der größte Leistungseinbruch ist um ca. 3 Uhr früh, das zweite Leistungstief - jedoch nicht so ausgeprägt - ist am frühen Nachmittag (ca. 15 Uhr) (Zulley, 1997) zu finden. Zu beiden Zeitpunkten ist mit Leistungseinbußen zu rechnen (Williamson, Feyer, Mattick, Friswell, & Finlay-Brown, 2001).

Neben diesen physiologisch bedingten Leistungstiefs während es Tages können für eine erhöhte Schläfrigkeit noch folgende Gründe verantwortlich gemacht werden:

- Störung der Atmung im Schlaf (z.B: Schlafapnoe-Syndrom, (SAS)) (Arzt & Obermeier, 2010; Bixler, Vgontzas, Ten Have, Tyson & Kales, 1998))
- Narkolepsie (Graubner, 2011)
- Unwillkürliche Bewegung der Gliedmaßen während der Schlafphase (z.B. Restless- Legs-Syndrom) (Trenkwalder, 1998)

- Andere Ursachen (z.B. psychische/organische Erkrankungen) (Classen et al., 2009)

Betrachtet man die angeführten Ursachen für Schläfrigkeit, so zeigt sich, dass diese zum Großteil medizinischer Art sind. Eine der am häufigsten auftretenden Störungen ist jene der Atmung und wird als Schlafapnoe-Syndrom (SAS) bezeichnet (Bixler, Vgontzas, Ten Have, Tyson & Kales, 1998).

Als Schlafapnoe werden Atemaussetzer während des Schlafes bezeichnet die pro Stunde bei gesunden Menschen bis zu fünf Mal vorkommen und eine zeitliche Dauer von ca. 10 Sekunden nicht übersteigen dürfen. Das Verhältnis von Atemaussetzern pro Stunde wird im sogenannten Apnoe/Hypopnoe-Index (AHI) angegeben (Hannemann, 2007). Werte zwischen 5 - 14 Aussetzern pro Stunde gelten als leichtes, zwischen 15 - 29 als mittelschweres und von mehr als 30 Aussetzern als schweres Schlafapnoe-Syndrom (Hannemann, 2007). Schlafapnoe tritt bei fast jedem Menschen während eines normalen Schlafzyklus auf, die Prävalenzrate steigt jedoch mit zunehmender Alter deutlich an (Arzt & Obermeier, 2010). Zudem zeigt sich ein Geschlechtereffekt, wobei vorwiegend Männer im Alter von 45 – 65 mit 12 % und im Alter von 65 - 100 mit 24 % Prävalenz vom Schlafapnoe-Syndrom betroffen sind (Bixler, Vgontzas, Ten Have, Tyson & Kales, 1998). Durch die hohe Anzahl an Atemaussetzern kommt es zu einer Unterversorgung mit Sauerstoff, was in weiterer Folge eine Aufwachreaktion des Körpers hervorruft. Durch diese Erkrankung ist die Person nicht mehr in der Lage tiefe Schlafphasen zu erreichen, was tagsüber zu einer erhöhten Schläfrigkeit führt.

Narkolepsie hat meist neurologische Ursachen und bezeichnet häufige Schlafattacken. Dem Patient ist es nicht möglich sich gegen diese Schlafattacken zu wehren und sie führen unweigerlich zum Einschlafen der betroffenen Person (Graubner, 2011). Die Prävalenz der Erkrankung liegt bei 0.02 - 0.05 % der Gesamtbevölkerung (Mayer, 2011). Durch dieses plötzliche Einschlafereignis stellt diese Erkrankung, vor allem bevor sie diagnostiziert ist, für den Straßenverkehr eine erhebliche Gefährdung dar, da es den Personen nicht möglich ist diesen Schlafzwang zu unterdrücken.

Als dritte Ursache für erhöhte Schläfrigkeit sind die unwillkürlichen Bewegungen der Gliedmaßen, vorwiegend der Beine, während der Schlafphasen zu nennen. Durch diese ständigen Bewegungen ist es der betroffenen Person nicht möglich einen erholsamen Schlaf zu finden. Die Prävalenz liegt in Deutschland bei ca. 5 - 10 % der Bevölkerung (AMWF, 2008) wobei 60 % der Betroffenen Frauen sind (Trenkwalder, 1998).

Andere Ursachen für einen übermäßigen Schlafdrang am Tag können psychische sowie organische Erkrankungen (Classen et al., 2009) sein. Psychische Auslöser für einen nicht erholsamen Schlaf können z.B. übermäßiger Stress oder berufliche/private Probleme darstellen. Betrachtet man die physische Komponente kann es z.B. durch starke Schmerzen nach einer Operation zu einer verschlechterten Schlafqualität kommen.

Eine Verringerung der vorhandenen Schläfrigkeit kann nur durch einen erholsamen Schlaf der betroffenen Person erfolgen (Spath, 2004; Zulley et al., 1995; Zulley & Knab, 2009). Andere Gegenmaßnahmen führen längerfristig nicht zu einer Verringerung der Schläfrigkeit. Zudem zeigt sich, dass der Begriff der Schläfrigkeit, zumin-

dest unter dieser Betrachtung als ein medizinisches Phänomen anzusehen (Classen et al., 2009) ist, und vom Begriff der Müdigkeit zu trennen ist (vgl. Abbildung 2). Wie sich in dieser Abbildung zeigt, wirkt sich Schläfrigkeit auf die Leistungsfähigkeit des Menschen aus. Somit ist davon auszugehen, dass durch Schläfrigkeit die Wahrscheinlichkeit, in einen Unfall verwickelt zu werden bzw. ihn selbst zu verursachen steigt (Smolensky, Di Milia, Ohayon & Philip, 2011).

Wie sich hier zeigt, können viele medizinische Aspekte für die Entstehung von erhöhter Schläfrigkeit verantwortlich gemacht werden. Das einzige Gegenmittel ist ein erholsamer Schlaf. Personen die an diesen medizinischen Ursachen leiden wurden für die Teilnahme an dieser Arbeit nicht zugelassen. Grund hierfür war, dass der Hauptfokus dieser Arbeit nicht auf Schläfrigkeit liegt.

Eine Zusammenstellung von schlafbedingten Störungen findet sich unter anderem in Classen et al., 2009 wieder.

In Anlehnung an Abbildung 2 ist die Müdigkeit davon abzugrenzen. Müdigkeit kann definiert werden als: „... die reversible Minderung der Leistungsfähigkeit eines Organismus als Folge von Tätigkeiten“ (Herczeg, 2005, S. 32). In der englischsprachigen Literatur wird Müdigkeit mit „Fatigue“ beschreiben, was nach Williamson et al. (2011) definiert ist als: „a hypothetical construct which is inferred because it produces measurable phenomena even though it may not be directly observable or objectively measurable“ (Williamson et al., 2011, S. 498f). Bartlett (1943) definiert „Fatigue“ wie folgt: „undesirable changes in performance that could be linked to continued activity“ (Bartlett, 1943, S. 250).

Im Gegensatz zu Schläfrigkeit entsteht Müdigkeit vorwiegend durch externe Einflussfaktoren (z.B. Art, Dauer, Anstrengung der zu bearbeitenden Aufgabe) (vgl. (Schmidt, 2010), vgl. Abbildung 2), wohingegen Schläfrigkeit vorrangig durch den zirkadianen Rhythmus, Schlafmangel bzw. medizinische Ursachen hervorgerufen wird.

Müdigkeit, die durch eine Aufgabe (vgl. Abbildung 2), z.B. der Fahraufgabe entsteht, lässt sich nach May & Baldwin (2009) bzw. Schmidt (2010) in zwei Gruppen unterteilen, entsteht erst nach einer gewissen Dauer der Aufgabenausführung und steigt mit zunehmender Aufgabendauer:

1. Aktive aufgabenbezogene Müdigkeit
2. Passive aufgabenbezogene Müdigkeit

Gruppe 1, die aktive aufgabenbezogene Müdigkeit bezieht sich im Kontext der Fahraufgabe vorrangig auf Situationen, in denen der Fahrer aufgrund von äußeren Gegebenheiten (z.B. schlechte Sicht, hohes Verkehrsaufkommen, etc.) einem hohen Beanspruchungsgrad ausgesetzt ist (Gimeno, Cerezuela, & Montanes, 2006).

Gruppe 2, die passive aufgabenbezogene Müdigkeit, entsteht im Kontext der Fahraufgabe durch sehr eintönige und hoch vorhersagbare Situationen (1991), wie sie sich beispielsweise auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen widerfinden.

Da in vorliegender Arbeit vorrangig gut ausgebaute Landstraßen bzw. Autobahnen verwendet wurden und somit bewusst möglichst monotone Umgebungsbedin-

gungen geschaffen wurden, ist für die weitere Beschreibung von Müdigkeit vor allem die passive aufgabenbezogene Müdigkeit relevant

Betrachtet man Abbildung 2, so zeigt sich, dass bestimmte Faktoren diese Art der Müdigkeit begünstigen können. Kommen Faktoren wie beispielsweise eine gut ausgebaute Straße, wenig Verkehrsaufkommen, eine geringe Reizdichte (z.B. Verkehrsschilder) und Dunkelheit zusammen, so begünstigen diese Faktoren einen Zustand beim Fahrer, der als Monotoniezustand (Hacker, 1998) bezeichnet werden kann. Monotonie wird laut DIN-Norm 10075-1 (2000) als „ein langsam entstehender Zustand herabgesetzter Aktivierung, der bei langdauernden, einförmigen und sich wiederholenden Arbeitsaufgaben oder Tätigkeiten auftreten kann und der hauptsächlich mit Schläfrigkeit, Müdigkeit, Leistungsabnahme und –schwankungen, Verminderung der Umstellungs- und Reaktionsfähigkeit sowie Zunahme der Schwankungen der Herzschlagfrequenz einhergeht“ DIN-Norm 10075-1 (2000) beschrieben.

Wie sich aus Abbildung 2 ableiten lässt, kann durch monotone Umgebungsbedingungen die passive aufgabenbezogene Müdigkeit gefördert werden. Diese führt letztendlich dazu, dass sich Leistungseinbußen in der Reaktion auf Reizen aus der Umwelt (Mackworth, 1957) einstellen. Dies zeigte sich auch in einer Untersuchung von Larue, Rakotonirainy und Pettitt (2011). Sie gingen der Frage nach, inwiefern sich die Straßengestaltung und eine Veränderung der Komplexität der Gestaltung des Straßenrandes auf die Hypovigilanz (vgl. Pawlik, 2006) und auf die Fahrperformanz auswirken. Hypovigilanz wurde hier durch die Aktivität im Elektroenzephalogramm (EEG) erfasst, die Fahrperformanz über die Fahrdaten in einem Fahrsimulator. Die Ergebnisse zeigten, dass es sowohl durch die Gestaltung der Straße als auch durch die monotone Gestaltung der Verkehrsumgebung zu einer verringerten Wachsamkeit der Fahrer kam. Während der Perioden von Hypovigilanz verschlechterte sich die Spurhaltung, die Time-to-Line-Crossing (TLC) wurde geringer und die Lidschlussfrequenz der Augenlider verringerte sich.

Bezieht man diese Ergebnisse auf das eingeführte Müdigkeitsmodell (Abbildung 2) wo sind diese Auswirkungen der passiven aufgabenbezogene Müdigkeit zu zuschreiben. Hier kommt es durch die monotone Gestaltung der Fahrumgebung bzw. Straße zu dieser Art der Müdigkeit. Diese mündet in einer Abnahme der Vigilanz welche sich letztendlich durch die Veränderungen im Fahr- bzw. Lidschlussverhalten widerspiegelt. Erst ab diesem Zeitpunkt ist ein Erkennen des Fahrerzustandes möglich.

Zwischengeschaltet sind nach der Abnahme der Vigilanz noch Kompensationsstrategien der Fahrer. Diese werden dann vom Fahrer eingesetzt, wenn ein bestimmter Grad an Müdigkeit erreicht ist (vgl. Hargutt, 2003; Schmidtke, 1965). Auch dieses Kompensationsverhalten durch den Fahrer stellt eine Möglichkeit dar, Müdigkeit zu erkennen.

Wie sich hier zeigt, ist es schwer möglich die Begrifflichkeiten Schläfrigkeit, Müdigkeit, Monotonie, Vigilanz, usw. exakt zu trennen. Zwar liegen unterschiedliche Ursachen vor, jedoch bleiben die Folgen, die letztendlich für eine Erkennung verwendet werden können, die Gleichen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Müdigkeit verwendet. Zudem gründet dies auch auf der Tatsache, dass zum einen Personen mit Schlafstörungen aus der Untersuchung ausgeschlossen wurden,

zum anderen Szenarien verwendet wurden, die eine Entstehung der passiven aufgabenbezogenen Müdigkeit fördern.

Um ein besseres Verständnis von Müdigkeit zu erhalten, werden im nächsten Abschnitt die angesprochenen Entstehungsgründe, Verläufe und Auswirkungen von Müdigkeit vor allem im Hinblick auf das Fahrverhalten beschrieben.

2.4 Entstehung von Müdigkeit

Bevor der Fokus auf die Fahraufgabe und die Auswirkung der Müdigkeit auf diese näher betrachtet wird, soll vorab eine allgemeine Aufstellung über die Ursachen, latenten und manifesten Folgen von Müdigkeit gegeben werden. Aus genannten Gründen werden nur die müdigkeitsbedingten Aspekte betrachtet und nicht jene Aspekte, die durch Schläfrigkeit entstehen.

Von Hargutt (2003), (Tabelle 2) liegt eine Aufstellung zum Thema Müdigkeit in Ursachen, Symptome, Konsequenzen und Gegenmaßnahmen vor.

Tabelle 2: Müdigkeit: Ursachen, Symptome, Konsequenzen, Gegenmaßnahmen (ergänzt) (Hargutt, 2003, S. 120).

| | | |
|-------------------|---------------|---|
| Ursachen (latent) | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Andauernde (berufliche) Anforderung (Platonov, 1994) ▪ Aussetzung an ungünstige Bedingungen, Stress, exzessive physische und mentale Aktivität (Platonov, 1994) ▪ Reduzierung körperlicher Reserven (Platonov, 1994) ▪ Vorausgegangene Tätigkeit des Organismus (Bornemann, 1952) ▪ physikochemische Schwächung des Gewebes (Bornemann, 1952) ▪ Folge von emotionalem Stress (Crawford, 1961) ▪ Inanspruchnahme von Kräften und Funktionen (Nitsch, 1971) ▪ Schwächung von Kräften und Funktionen (Nitsch, 1971) ▪ Stress über einen längeren Zeitraum (Cameron, 1973) ▪ Anforderung der Stressbewältigung (Brown, 1994) ▪ Daueraufmerksamkeit für gelegentliche, unvorhersehbare Ereignisse (Brown, 1994) ▪ Physiologische Beeinträchtigung sind keine notwendige Voraussetzung für Müdigkeit (Brown, 1994) ▪ Beanspruchung (Schmidtke, 1993) ▪ Intensive und/oder anhaltende kognitive Auslastung (Bodrov, 1988) ▪ Mangelnde Reserven aufgrund andauernden Arbeitens bei hohem Informationsverarbeitungsgrad (Finkelman, 1994) ▪ Beanspruchung des Autofahrens durch Monotonie (Reitter, 2000) |
| Symptome | subjektiv | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gefühl der Mattigkeit (Bartley & Chute, 1947) ▪ Unlust an der laufenden Aktivität (Bartley & Chute, 1947) ▪ Fehlende Bereitschaft, mit Aktivität fortzufahren (Bartley & Chute, 1947) ▪ Wunsch, die momentane Tätigkeit zu beenden (Bartlett, 1948) ▪ Individuelle Wahrnehmung, mit den stressreichen Anforderungen nicht mehr fertig zu werden (Cameron, 1973) ▪ Gefühl, Arbeit über einen Zeitpunkt hinaus fortsetzen zu müssen, obwohl man empfindet, die Arbeit nicht mehr effizient leisten zu können (Brown, 1994) |
| | physiologisch | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierte Aktiviertheit (Okogbaa, Shell & Filipusic, 1994) ▪ Erhöhung des generellen emotionalen Arousalzustands (Crawford, 1961) |

| | | |
|-------------------------|--------------------------------------|---|
| | (manifest) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierte Aktivität |
| | Verhalten, Leistung (manifest) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Leistungsminderung (Bornemann, 1952) ▪ Reduzierte mentale Leistungsfähigkeit (Åkerstedt, Torsvall & Gillberg, 1987; Okogbaa et al., 1994) ▪ Neigung zu aggressiven Reaktionen (Bartlett, 1948) ▪ Unfähigkeit, sich zu konzentrieren (Bartlett, 1948) ▪ Verminderte Antizipationsspanne (Bartlett, 1948) ▪ Reduzierte Leistungsfähigkeit (Nitsch, 1971) ▪ Verminderte Anpassungs- und Stabilisierungsfähigkeit eines biologischen Systems (Nitsch, 1971) |
| Konsequenzen (manifest) | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Störung von Regulationsmechanismen (Platonov, 1994) ▪ Verminderte Adaptionfähigkeit (Platonov, 1994) ▪ Nicht nur einzelne Funktionsminderungen, sondern auch Veränderung des Funktionsgefüges des Organismus (Bornemann, 1952) ▪ Abnahme der Funktionsfähigkeit eines Organs oder Organismus (Schmidtke, 1993) ▪ Temporäre Veränderung von körperlichen Funktionen, von Effizienz und Qualität der Leistung (Bodrov, 1988) |
| Gegenmaßnahmen | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Restitutive Prozesse (Nitsch, 1971) |

Nach den Autoren Vanlaar, Simpson, Mayhew und Robertson (2008), Hargutt (2003), Maycock (1997), Smolensky, Di Milia, Ohayon und Philip (2011) & Williamson et al. (2011) gibt es für die Entstehung der Müdigkeit viele Ursachen. Fasst man Tabelle 2 bezüglich der Ursachen für die Entstehung von Müdigkeit zusammen, so stellen sich vielfach psychische Belastungsfaktoren (Stress, exzessive mentale Aktivität, Beanspruchung, Daueraufmerksamkeit, Monotonie, usw.) als Ursache dar. Implizit findet sich zudem in Tabelle 2 auch die Time-On-Task (Fairclough & Graham, 1999) wieder, welche die Zeit beschreibt, wie lange eine Aufgabe bereits ausgeführt wird.

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, führen nicht nur hohe Anforderungen, sondern auch Aufgaben, die eine Unterforderung der ausführenden Person darstellen zur Ermüdung. Neben diesen Entstehungsgründen für Müdigkeit ist es im Rahmen dieser Arbeit von besonderem Interesse, ob und wie sich Müdigkeit über die Zeit hinweg verändert.

2.5 Verlauf von Müdigkeit

Abgesehen von den unterschiedlichen Ursachen, ist der Verlauf der Müdigkeit insbesondere im Bezug auf die Fahraufgabe sehr relevant.

Müdigkeit wird in der Literatur selten als Zustand beschrieben, sondern meist als Prozess (Reiß & Krüger, 1995). Es finden sich zahlreiche Befunde über den Prozessverlauf der Müdigkeit (Bartley & Chute, 1947; Cameron, 1973; Finkelman, 1994; May & Baldwin, 2009). Müdigkeit steht am Anfang einer Aufgabe meist auf einem sehr geringen Niveau (Schmidt, 2010). Erst mit zunehmender Dauer der Aufgabe erhöht sich das Müdigkeitsniveau (Time-On-Task-Effekt). Dabei spielt nicht nur die zeitliche Dauer eine wichtige Rolle, sondern auch der Inhalt der Aufgabe ist für die Entstehung und den Verlauf von Müdigkeit von Bedeutung.

Nach Åkerstedt, Torsvall und Gillberg (1987) werden unterschiedliche Stadien der Müdigkeit durchlaufen. Sie differenzieren zwischen einem mäßigen und einem hohem Müdigkeitsniveau. Das mäßige ist dabei durch eine verringerte Aktivierung sowie einem Gefühl der allgemeinen Verlangsamung gekennzeichnet. Das hohe ist durch ein Brennen der Augen, Schwierigkeiten die Augen noch geöffnet zu halten und einer verminderten Konzentrationsfähigkeit gekennzeichnet. Somit teilen Åkerstedt et al (1987) Müdigkeit in 2 Stadien ein.

Eine weitere Möglichkeit für die Betrachtung des Verlaufs der Müdigkeit ist die nach Schmidtke (1965). Er postuliert nicht nur zwei Niveaus von Müdigkeit sondern teilt Müdigkeit in 4 Stadien auf.

(1) Das erste Stadium ist gekennzeichnet durch eine allgemeine Verlangsamung von psychischen Prozessen, verminderten Koordinationsvorgängen sowie Fehlleistungen. Dieses Stadium lässt sich mit dem ersten von Åkerstedt vergleichen.

(2) Im zweiten Stadium ist sich das Individuum bereits seiner Müdigkeit bewusst und versucht aktiv Schwankungen in der Leistung entgegenzusteuern.

(3) Ist die Person nicht mehr in der Lage diese Leistungsdefizite aktiv auszugleichen ist nach Schmidtke (1965) das dritte Stadium erreicht. Zu der kaum mehr vorhandenen Kompensation von Leistungsschwankungen kommt ein generelles Absinken des Leistungsniveaus hinzu (vergleichbar mit Stadium 2 von Åkerstedt).

(4) Im vierten Stadium kommt es zu einer „Störung des Funktionsgefüges“, was sogar als qualitative Veränderung der Persönlichkeit gedeutet werden kann, also bereits pathologischen Charakter hat („...ähnlich wie Zustände nach Narkotikaeinnahme...“ (Hargutt, 2003, S. 122)).

Interessant ist hier, dass Schmidtke (1965) in Stadium zwei ein aktives Entgegenwirken bei Leistungsschwankungen einführt. Überträgt man dieses Kompensationsverhalten auf die Situation im Fahrzeug, so könnte es hier eine erhöhte Aktivität sein (z.B. das Hin- und Herrutschen im Sitz) die in diesem Stadium bei den Fahrern zu beobachten ist. Diese Gegenmaßnahmen bringen zwar kurzfristig eine Aktivierung mit sich, welche sich jedoch schnell wieder verliert, wenn die Fahrt nicht unterbrochen wird (vgl. Hell, 2008; Oron-Gilad, Ronen & Shinar, 2008; Stephan, 2005).

Wird trotz dieser Anzeichen die Aufgabe weiter ausgeübt ergeben sich (nach Schmidtke, 1965) unweigerlich Auswirkungen der Müdigkeit auf die Leistungsfähigkeit der Person.

2.6 Auswirkung von Müdigkeit

Die Entstehung bzw. der Verlauf von Müdigkeit gibt zum Teil schon Aufschluss darüber, wie sich Müdigkeit auswirken kann (Tabelle 2). Da es nahezu unmöglich ist, sämtliche Ursachen von Müdigkeit konkret zu erfassen, ist ein Erkennen und Messen erst dann möglich, wenn sich die Folgen bzw. Auswirkungen der Müdigkeit zeigen.

In dieser Arbeit haben vor allem die Auswirkungen der Müdigkeit auf die Fahraufgabe Relevanz. Erst wenn man Müdigkeit über Ihre Konsequenzen detektieren kann, wird es möglich, von technischer Seite aus Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Daher sollen die Auswirkungen auf die Fahraufgabe bzw. auf das Fahrverhalten näher betrachtet werden.

Das erfolgreiche Absolvieren der Fahraufgabe erfordert ein hohes Maß an kognitiven Leistungen (Rasmussen, 1987; Reitter, 2000). Durch Müdigkeit können Aspekte dieser, für die sichere Fahrzeugführung erforderlichen Leistungen, beeinflusst werden (Krajewsky 2007). So ergeben sich unter dem Einfluss von Müdigkeit Leistungseinbußen für z.B. die Funktionen des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses, der selektiven Aufmerksamkeit sowie der Daueraufmerksamkeit (Kotterba et al., 1998). Ebenso wird auch von einer reduzierten Kapazität des visuellen Kurzzeitgedächtnisses berichtet sowie verlängerten Reaktionszeiten in einer visuellen Aufmerksamkeitsaufgabe (Chee et al., 2006). Untersuchungen bezüglich einer Verminderung der Vigilanz wurden u.a. von Barbé et al. (1998) durchgeführt. Auswirkungen auf das Situationsbewusstsein (vgl. Harwood, Barnett & Wickens, 1998) wurden ebenso untersucht wie der Einfluss der Müdigkeit auf die motorische Kontrolle (vgl. Harwood et al., 1998) und der überwachenden Steuerung (Nilsson et al., 2005). Hier zeigen sich durch den Einfluss von Müdigkeit durchgehend negative Konsequenzen für die Leistungsfähigkeit.

Häufig findet man Untersuchungen, die durch Schlafdeprivation Müdigkeit bzw. Schläfrigkeit induzieren und dann diese Effekte erfassen. Des Weiteren werden oft Vergleichsstudien, z.B. mit einer bestimmten Menge Blutalkohol oder Drogen in Bezug auf Müdigkeit durchgeführt. Es zeigt sich jedoch auch, dass die gefundenen Ergebnisse der einzelnen Studien sehr unterschiedlich ausfallen, teilweise jedoch die Auswirkungen sich sehr ähnlich darstellen. Dies soll kurz anhand einer Studie dargestellt werden, welche auch Hinweise über die motorische sowie kognitive Leistungsveränderung aufzeigt.

Williamson, Feyer, Mattick, Friswell und Finlay-Brown (2001) führten einen Vergleich zwischen Müdigkeits- und Alkoholauswirkung durch. Sie untersuchten mit welcher Blutalkoholkonzentration (BAK) sich eine Schlafdeprivation von 28 Stunden vergleichen lässt. Die BAK wurde bei den Personen schrittweise erhöht, wobei mit einer Dosis von 0.25 g/kg begonnen wurde. Die höchste Konzentration ist mit 0.35 g/kg angegeben. An der Untersuchung nahmen 20 Berufskraftfahrer und 19 Nicht-Berufskraftfahrer teil. Es wurden Tests verwendet, deren Ergebnisse sich in der Vergangenheit als gute Indikatoren für Müdigkeit herausgestellt hatten (z.B. Reaktionstest, Tracking-Test, Vigilanztest, Visueller Suchtest, Test zum räumlichen und logischen Denken). Eine Erhebung der Fahrleistung wurde in dieser Untersuchung nicht vorgenommen. Trotzdem kann durch den Vergleich aufgezeigt werden, welche Fähigkeiten einer Person durch Schlafdeprivation bzw. Alkohol beeinträchtigt sein können. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Auswirkungen mit zunehmender Müdigkeit bzw. Blutalkoholkonzentration angeführt.

Tabelle 3: Veränderungen der Leistungsparameter mit steigender Müdigkeit bzw. Alkoholkonzentration in den unterschiedlichen Leistungstests.

| Reaktionszeit | Tracking Test | Dual Task | Mackworth Vigilanzuhr | Symbol-Zahlen Zuordnung | Visueller Suchtest | Reproduzieren |
|------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Langsamer | Verschlechterung | Langsamer | Langsamer | Langsamer | Keine Effekte | Verkürzt |
| Langsamer | Verschlechterung | Langsamer | Langsamer | Langsamer | Keine Effekte | Verkürzt |

Müdigkeit = Kursiv & Fettschrift, Alkoholeinfluss = Normalschrift.

Wie sich in Tabelle 3 zeigt, sind die Auswirkungen von Alkohol und Schlafdeprivation bzw. Müdigkeit sehr ähnlich. Die Autoren fanden über die unterschiedlichen Testsequenzen zwar eine Veränderung in den Leistungsmaßen, es fanden sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Teilnehmern der Alkohol bzw. Schlafdeprivationsgruppe. Grundsätzlich zeigt sich aber, dass sich die Reaktionszeiten verlangsamen und sich die Fähigkeit Stabilisierungsaufgaben (Tracking-Test) zu bewältigen, verschlechtert. Ebenso wird eine Zweitaufgabe (Dual Task) langsamer ausgeführt und ein Anstieg an „Misses“, an verpassten Antworten ist zu finden. Zudem zeigt sich unter einer monotonen Bedingung (Vigilanzuhr), dass die Reaktionszeit langsamer wird und es vermehrt zu falschen Alarmen kommt. Des Weiteren findet sich bei der Verknüpfung von Zahlen und Symbolen ebenfalls eine Zunahme der Reaktionszeit. Lediglich für die visuelle Suche wurde weder für die Schlafdeprivierten noch für die Personen unter Alkoholeinfluss ein signifikanter Effekt gefunden. Nur für das verwendete Stimulusmaterial (2 bzw. 6 Zeichen) wurde ein Effekt gefunden. Dieser zeigt sich aber für beiden Gruppen, wobei 2 Zeichen schneller erkannt wurden als 6 Zeichen. Hinsichtlich des Reproduzierens (Abfolge von 9 Quadraten wiedergeben) zeigt sich wiederum, dass mit zunehmender Müdigkeit bzw. Alkoholeinfluss die korrekte Abfolge verkürzt wiedergegeben werden kann.

Wie sich hier bereits zeigt, können sich durch Müdigkeit bzw. Schlafentzug sowohl auf der kognitiven als auch auf der motorischen Ebene Defizite ergeben. Es wurden in der angeführten Untersuchung zwar LKW-Fahrer und „normale“ Fahrer als Versuchspersonen verwendet, es wurden jedoch keine Fahrversuche durchgeführt. Somit lässt sich durch diese Studie nur der Einfluss von Müdigkeit auf die Leistung nachweisen, es ist dadurch jedoch nicht möglich, Aussagen darüber zu erhalten, wie sich Müdigkeit auf das Fahrverhalten auswirkt.

Bezieht man diese Auswirkungen auf die Fahraufgabe, so zeigt sich, dass zum einen die Stabilisierungsebene betroffen sein kann (Nilsson et al., 2005) es jedoch auch Auswirkungen auf die nächsthöhere Ebene, die Führungsebene geben kann. (Harwood et al., 1998). Demzufolge sollte eine Unterstützung des Fahrers bei Müdigkeit bereits auf der Stabilisierungsebene ansetzen. Des Weiteren sollten mögliche negative Auswirkungen der Müdigkeit auf der Führungsebene (z.B. Abstandshaltung) möglichst frühzeitig erkannt, und, sofern möglich, verhindert werden. Aber was verändert sich nun bei einem Fahrer, der unter Müdigkeit ein Fahrzeug lenkt? Diese Auswirkungen auf das Fahrverhalten werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

2.6.1 Fahrverhalten

Untersuchungen zum Fahrverhalten unter Müdigkeitseinfluss wurden vielfach durchgeführt (Di Milia et al., 2011; Gunzelmann, Moore Jr., Salvucci & Gluck, 2009; Noy et al., 2011; Smolensky et al., 2011; Williamson et al., 2011).

Um die Auswirkungen von Müdigkeit auf das Fahrverhalten zu verdeutlichen, werden nachfolgend einige Studien aufgeführt, die sich mit dem Thema Müdigkeit und Fahrverhalten beschäftigten. Hierbei dient zur besseren Übersicht Tabelle 4. Für die angeführten Studien sind jeweils die Autoren, die Stichprobe, die Art der Müdigkeitserfassung sowie deren Induktion, die durchzuführende Fahraufgabe sowie die Auswirkungen der Müdigkeit, dargestellt. Zur einfachen Lesbarkeit dieser werden nur die Effekte berichtet, die eine Veränderung mit *zunehmender* Müdigkeit aufzeigen.

Tabelle 4: Fahrverhaltensänderungen unter Müdigkeit.

| Autor | Stichprobe | Müdigkeitserfassung/Induktion | Fahraufgabe | Auswirkung |
|---|------------|---|--|---|
| Philip et al. (2005a) | N = 22 | KSS, VAS (100mm) Schlafdeprivation (SD) (Schlaf für 2 Stunden bzw. 8 Stunden) | 5 x 105 Minuten Realfahrt (AB) insgesamt 1000KM | - Mehr Spurüberschreitungen (535 vs. 66) nach SD (Fahrzeug über Spurmarkierung) |
| Philip et al. (2005b) | N = 12 | KSS SD (Schlaf für 2 Stunden bzw. 8 Stunden) | 6 x 105 Minuten Realfahrt (AB), 105 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Mehr Spurüberschreitungen (Fahrzeug über Spurmarkierung) - Längere RZ nach SD (713ms vs. 490ms) und im Simulator (630ms vs. 533ms) |
| Contradi, Pizza, Sancisi und Mondini (2004) | N = 10 | SSS, VAS (100mm) SD (Test von 10 Uhr bis 12 Uhr nächsten Tag) | 30 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Größere Standardabweichung in der Spurhaltung (.28cm vs. .39cm) |
| Risser, Ware und Freeman (2000) | N = 15 | VAS (100mm) | 60 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - OSAS-Gruppe größere Schwankung in der Spurhaltung, mehr Geschwindigkeitsvariabilität, mehr Lenkwinkelvariabilität |
| Moller et al. (2006) | N = 31 | VAS (100mm) | 30 Minuten Simulatorfahrt alle 2 Stunden ab 10 Uhr bis 16 Uhr (AB) | - Höhere Geschwindigkeit - Längere RZ |
| Paul, Boyle, Tippin und Rizzo (2005) | N = 24 | OSAS-Patienten | 60 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Während MS geringere TLC (1.7sek vs. 2.6sek), höhere Lenkwinkelvariation, höhere Spurhalteschwankung (.16cm vs. .09cm) im Vergleich zu Pre- und Postmikroschlafphasen |

| | | | | |
|---|--------|--|---|--|
| Boyle, Tippin, Paul & Rizzo, (2008) | N = 24 | ESS, OSAS-Patienten | 60 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - höhere Lenkentropie, höhere SDLP, geringere mittlere Geschwindigkeit während MS |
| King, Mumford und Siegmund (1998) | N = 19 | SD in der Nacht zuvor | Fahren bis Testabbruch (Realfahrt, Testgelände) | - Fahrer die abbrechen überschritten öfter die vorgegebenen Grenzen der Ellipse |
| Schramm, Fuchs, Wagner und Bruder (2009) | N = 46 | KSS, Keine | 3 Stunden Rundkurs von 1.9 km Länge befahren (Realfahrt, Testgelände) | - Mehr Steering Wheel Reversal Rates (3 vs. 4.5) - mehr große Lenkradbewegungen (3.5 vs. 5) |
| Pizza, Contradi, Mostacci und Cirignotta (2004) | N = 10 | SSS, VAS, (100mm) 6-7 Stunden Schlaf, SD (gesamte Nacht) | 4 x 30 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Mehr Geschwindigkeitsüberschreitungen nach SD |
| Fairclough und Graham (1999) | N = 64 | KSS, SD, Alkohol | 2 x 40 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Höhere Geschwindigkeitsvariation bei SD (9.2km/h vs. 6.7km/h) als bei Alkohol |
| Baulk, Reid, Van den Heuvel, C.J. und Dawson (2008) | N = 15 | Wachdauer: 4, 8, 18 bzw. 24 Stunden | 4 x 30 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Höhere Geschwindigkeitsvariation, mehr Kollisionen und mehr Spurüberschreitungen mit zunehmender Wachdauer |
| Lenné, Triggs und Redman (1998) | N = 24 | VAS, SD für 24 Stunden | 4 x 20 Minuten Simulatorfahrt (AB) | - Höhere Standardabweichung Geschwindigkeit und Spurhaltung nach SD - Abfall der mittlere Geschwindigkeit nach SD um 14 Uhr |

Anmerkungen: SD = Schlafdeprivation, MS = Mikroschlafereignis, KSS = Karolinska Sleepiness Scale, ESS Epworth Sleepiness Scale, SSS = Stanford Sleepiness Scale, VAS = Visuelle Analogskala, RZ = Reaktionszeit, OSAS = obstruktive Schlafapnoesyndrom.

Wie sich aus Tabelle 4 entnehmen lässt, zählt die Spurhaltung zu einem der Parameter, der sich sehr oft in Zusammenhang mit Müdigkeit im Fahrzeugkontext finden lässt (vgl. Contradi, Pizza, Sancisi & Mondini, 2004; Findley et al., 1995; Lertzman, Wali & Kryger, 1995; Pack et al., 1995; Wu & Yan-Go, 1996). Nachfolgend werden einige Ergebnisse hierzu berichtet.

Eine Studie von Philip et al. (2005b) untersuchte die Auswirkung von Schlafdeprivation auf die Fahrperformanz in einer realen und simulierten Fahrumgebung im Vergleich zu einer Bedingung ohne Schlafdeprivation. 12 Männer mit geringer Fahrfahrung nahmen an dem Experiment teil. In ausbalancierter Reihenfolge fuhren sie

entweder in der realen Fahrumgebung (Autobahn in Frankreich) oder in einem Fahr-simulator. Erhoben wurden neben der subjektiven Müdigkeit (KSS), Reaktionszeiten (Knopfdruck nach Erscheinen eines Quadrates auf einem PALM) die Anzahl an unangemessenen Spurüberschreitungen (gesamtes Fahrzeug überquert die linke bzw. rechte Spurmarkierung). Es zeigte sich, dass die Schlafdeprivation sowohl in der Real-fahrtbedingung wie auch im Fahr-simulator zu einem Anstieg der inadäquaten Spurüberschreitungen (Real: 1 vs. 6; Simulator: 60 vs. 150) führte. Ebenso wurden signifikant negative Auswirkungen der Schlafdeprivation (713 ms vs. 490 ms) sowie des Simulators (630 ms vs. 533 ms) auf die Reaktionszeit gefunden. Da hier nur die Überschreitung der Spurmarkierung anhand von Videos verrechnet wurden, jedoch nicht die Spurhaltung direkt, soll diese nachfolgend im Kontext der Müdigkeit beleuchtet werden.

Eine Studie, die sich mit Müdigkeit und dem Spurhaltemaß der lateralen Abwei-chung beschäftigt hat, ist jene von Contradi, Pizza, Sancisi und Mondini (2004). Sie prüften inwiefern zirkadiane Rhythmen bei Fahrten im Simulator abgebildet werden können und brachten dies in Zusammenhang mit Müdigkeit. Untersucht wurden fünf Frauen und fünf Männer. Der Versuch erstreckte sich über zwei Tage, wobei zwi-schen den beiden Tagen nicht geschlafen wurde. Als Fahr-szenario wurde eine mo-notone Autobahnstrecke erstellt, die im Rhythmus von zwei Stunden jeweils für einen halbe Stunde zu befahren war. Die Ergebnisse zeigten eine signifikant größere Stan-dardabweichung der Spurhaltung (.28 cm vs..39 cm) bei zunehmender Müdigkeit (Abbildung 3) unabhängig vom zirkadianen Rhythmus.

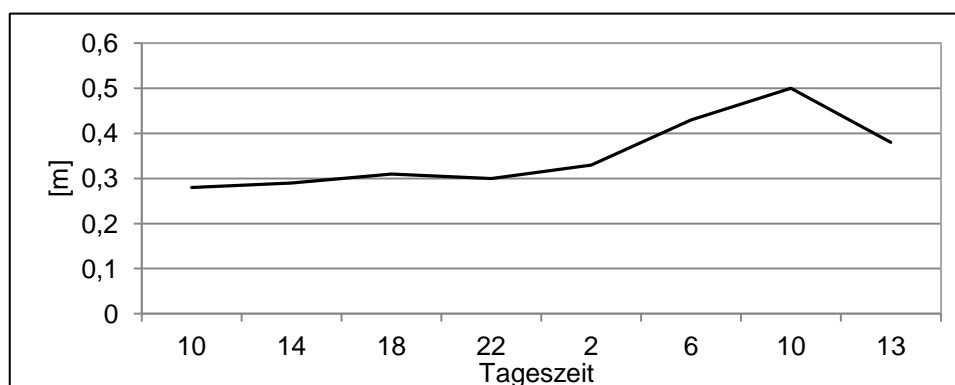


Abbildung 3: Standardabweichung der Spurhaltung (zit. nach Contradi et. al. 2004, S. 429).

Ein gleiches Ergebnis findet sich auch in einer Untersuchung von Risser, Ware und Freeman (2000). Sie verglichen die Fahrperformanz zwischen Patienten mit einem obstruktiven Schlafapnoe-Syndrom (OSAS), welches laut Literatur mit einer erhöhten Unfallgefahr und einer schlechteren Fahrperformanz einhergeht (vgl. Findley et al., 1995; Lertzman et al., 1995; Pack et al., 1995; Wu & Yan-Go, 1996), und gesunden Personen. Sie ließen die Teilnehmer in einer Fahr-simulation 60 Minuten fahren und zeichneten die Spurhaltemaße und das EEG der Personen auf. Es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen für die Spurposition (Abbildung 4), die Lenkwinkelvariabilität und der Geschwindigkeitsschwankung wobei die OSAS-Gruppe größere Werte aufweist. Zudem zeigt sich, dass die OSAS-

Gruppe sich durchwegs als signifikant müder einschätzt im Vergleich zu den gesunden Probanden.

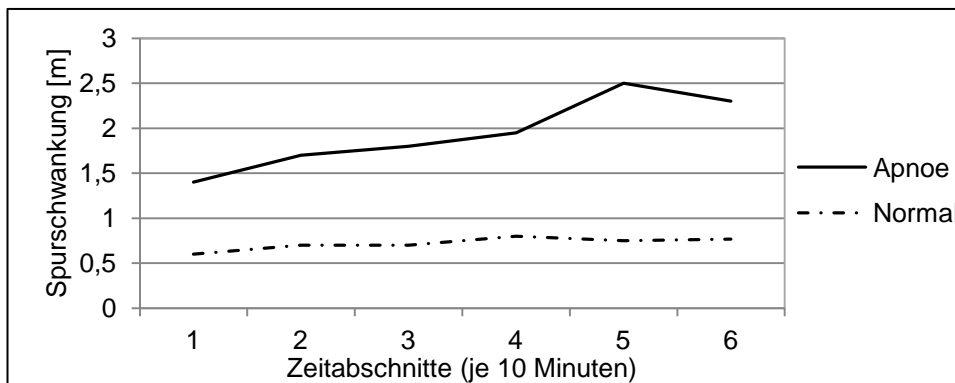


Abbildung 4: Spurhaltung von gesunden Personen und OSAS-Patienten (zit. nach Risser et al. 2000, S. 4).

Eine weitere Studie, die Spurüberschreitungen im Zusammenhang mit Müdigkeit analysiert hat, ist jene von Philip et al. (2005a). Sie untersuchten den Einfluss von Schlafdeprivation auf die Häufigkeit von Spurüberschreitungen im Realverkehr im Vergleich zu einer Kontrollbedingung (ohne Schlafdeprivation). 22 Fahrer absolvierten eine 10-stündige Strecke von 1000 km, die in je 105-minütige Abschnitte unterteilt wurde. Die Spurüberschreitungen (gesamtes Fahrzeug über Spurmarkierung), die subjektive Müdigkeit (KSS, VAS) sowie das Reaktionsvermögen in einem Test wurden aufgezeichnet und ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Gesamtanzahl an Spurüberschreitungen mit Schlafdeprivation signifikant anstieg (535 Spurüberschreitungen mit vs. 66 ohne Schlafdeprivation). Des Weiteren zeigte sich, dass ein höherer Müdigkeitswert mit einer Zunahme der inadäquaten Spurüberschreitungen einherging. Dieser Effekt zeigte sich jedoch nicht, wenn sich die Personen vor dem Versuch ausschlafen konnten.

Eine weitere Studie die sich mit der Spurhaltung beschäftigte wurde von Moller et al. (2006) durchgeführt. Die Autoren untersuchten den Einfluss der Tageszeit auf das Fahrverhalten. 31 gesunde Fahrer fuhren um 10, 12, 14 und 16 Uhr jeweils 30 Minuten in einer Fahrsimulation. Gemessen wurden Spurhaltung, Geschwindigkeit, Mikroschlafereignisse, subjektive Müdigkeit (VAS), Wachheit (VAS) sowie das Reaktionsvermögen. Die Ergebnisse zeigten signifikante Tageszeitschwankungen für das Reaktionsvermögen (960 ms um 10 Uhr vs. 1040 ms um 16 Uhr), die Spurhaltung (29.8 cm um 10 Uhr vs. 28.3 cm um 14 Uhr), die Geschwindigkeit (87.5 km/h um 10 Uhr vs. 89.5 km/h um 16 Uhr) und Mikroschlafereignisse (0.6 um 10 Uhr vs. 1.2 um 16 Uhr). Die Autoren legen hier aber nahe, dass es sich bei den gefundenen Befunden eher um die zirkadianen Schwankungen handelt als um reine Müdigkeitseffekte.

Fasst man diese Ergebnisse kurz zusammen, so zeigt sich schon, dass sich Müdigkeit im Fahrverhalten durchaus in sicherheitskritischen Parametern zeigt und somit ein großes Gefahrenpotential darstellen kann. Klar deutlich wird dies vor allem in der Untersuchung von Philip et al. (2005a), in der unter der Müdigkeitsbedingung insgesamt mehr als 500-mal die Fahrbahn verlassen wurde.

Ein weiterer Parameter, der sich ebenfalls aus der Spurhaltung, jedoch in Verbindung mit der aktuellen Geschwindigkeit errechnen lässt um Müdigkeit zu erkennen ist die „Time to Line Crossing“ (TLC) (Godthelp, Milgram & Blaauw, 1984). Godthelp, Milgram und Blaauw (1984) definieren die TLC wie folgt: „The time remaining before the driver's vehicle will reach a lane boundary assuming the current steering wheel angle remains constant and the driver fails to intercede“. Im einfachsten Fall errechnet sich die TLC aus dem Abstand des vorderen Reifens durch die laterale Geschwindigkeit zum jeweiligen Seitenstreifen (linke oder rechte Fahrbahnseite) (Abbildung 5).

$$\text{TLC}_{\text{lateral}} = \min \left\{ \frac{DL}{D'L}, \frac{DR}{D'R} \right\}$$

Abbildung 5: TLC-Berechnung für linke und rechte Spurseite (einfache Methode) (Paul, Boyle, Tippin & Rizzo, 2005, S. 19).

Anmerkung: DL = Distanz linken Fahrbahnrand, D'L = Laterale Geschwindigkeit linker Rand, DR = Distanz rechten Fahrbahnrand, D'R = Laterale Geschwindigkeit rechter Rand.

Weitere Berechnungsmethoden sowie eine systematische Gegenüberstellung der einzelnen Verfahren finden sich unter anderen in Winsum van, Brookhuis und De Waard (2000), Mammar, Glaser und Netto (2006) bzw. (Lin & Ulsoy, 1996). Winsum van, Brookhuis und De Waard (2000) bestätigten in ihrer Untersuchung, dass für eine Detektion eines Einschlafereignisses der einfache Berechnungsvorgang (Lateraler Abstand/laterale Geschwindigkeit) als ausreichend angesehen werden kann. Für eine genauere Differenzierung über den Fahrerzustand empfehlen die Autoren komplexere Berechnungen, wobei auch die Fahrzeug-Trajektorie mit einbezogen werden soll. Eine Aussage über die Möglichkeit mit einer simplen Berechnung der TLC frühe Müdigkeitsstufen zu detektieren wird von den Autoren nicht postuliert. Der Ansatz anhand der TLC Einschlafereignisse zu detektieren wurde unter anderen in einer Untersuchung von Paul, Boyle, Tippin und Rizzo (2005) betrachtet.

Sie untersuchten in einem Fahrsimulatorexperiment 24 Personen die an einem obstruktiven Schlafapnoesyndrom litten. Verglichen wurde hierbei das Fahrverhalten in Phasen eines Mikroschlafes (definiert als EEG Aktivität von 3-14 Sekunden in einem Frequenzband von 4-7 Hz (Theta)) mit jeweils drei Sekunden vor und drei Sekunden nach dem Mikroschlafereignis. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der TLC so zeigte sich, dass sich die drei Phasen (vor, während und nach einem Mikroschlaf) hinsichtlich der TLC signifikant unterschieden (Abbildung 6).

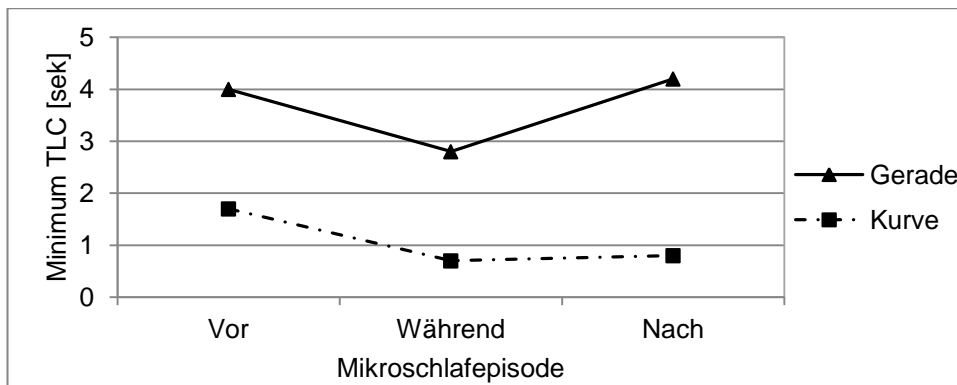


Abbildung 6: TLC vor, während und nach einer Mikroschlafepisode (zit. nach Paul et al., 2005, S. 22).

Die Analyse der Phasen zeigte, dass sich die TLC während des Mikroschlafes (1.7 sek) von jener vor und nach dem Ereignis (2.6 sek) unterschied und signifikant geringer war. Zusätzlich fanden die Autoren, dass die TLCs in Kurven signifikant geringer waren als an geraden Streckenabschnitten. Ebenso zeigte sich, dass sich die Spurhaltung (.16 cm vs. .9 cm) sowie die Lenkwinkelvariation (größer bei MS) in den Mikroschlafphasen signifikant von den Pre- und Postphasen unterschieden. Auch hier zeigt sich wieder, dass mit zunehmender Müdigkeit die Zeit bis zum Verlassen der Fahrbahn sinkt und somit das Risiko für einen Unfall steigt. Zudem zeigt sich in dieser Untersuchung, dass die TLC Mikroschlafereignisse entdecken kann, allerdings kann keine Ableitung darüber getroffen werden, ob auch frühere Müdigkeitszustände durch die TLC erkannt werden können.

Ein weiteres Maß, welches sich ebenfalls auf die Spurhaltung bezieht, ist die „Distance to Line Crossing (DLC)“. Dieses Maß beschreibt den Abstand des rechten bzw. linken Fahrzeugreifens zur rechten bzw. linken Fahrspurmarkierung zu einem gegebenen Zeitpunkt. Verwendung findet dieser Wert bei Spurhalteassistenten (Jung & Kelber, 2005) bzw. um Fahrer in Ablenkungsphasen bzw. bei Unaufmerksamkeit auf das bestehende Risiko die Spurmarkierung zu überfahren, hinzuweisen (Glaser, Mammar, Netto & Luseti, 2005). Da sich diese Maßzahl auch in anderen Spurwerten widerspiegelt wurde sie bis dato nicht explizit verwendet, um Müdigkeit zu detektieren. Die Befunde in der Literatur legen jedoch nahe, dass sich Fahrer mit zunehmender Müdigkeit stärker am Fahrbahnrand orientieren (Arnedt et al., 2001; Boyle et al., 2008) und demzufolge auch die DLC verrechnet werden könnte. Hier könnte es sinnvoll sein, die Zeit innerhalb eines bestimmten Abstands zur Spurmarkierung für eine Müdigkeitsdetektion zu verwenden.

Wie sich insgesamt für die Spurhaltung zeigt, finden sich durchwegs Auswirkungen der Müdigkeit auf diese Parameter. Was fast durchgängig beobachtet werden kann ist ein Anstieg an Spurüberschreitungen sowie eine Verringerung der TLC-Werte. Zudem findet sich in mehreren Untersuchungen auch eine größere Schwankung in der Standardabweichung der Spurhaltung. Allerdings zeigt sich auch hier, dass die angegebenen Werte zwischen den einzelnen Studien durchaus schwanken.

Als weitere Indikatoren für die Erfassung von Müdigkeit im Fahrzeugkontext werden häufig die Lenkradbewegung bzw. unterschiedliche Lenkradwinkelmaße herangezogen (Boyle, Tippin, Paul & Rizzo, 2008; Otmani, Roge & Muzet, 2005; Thiffault

& Bergeron, 2003). Je nach Autor bzw. Autorengruppe werden hierfür unterschiedliche Parameter betrachtet. Im Allgemeinen wird hierbei nach Veränderungen im Lenkradwinkelsignal gesucht.

Einer dieser Parameter ist die Standardabweichung des Lenkradwinkels. Die Autoren Boyle et al. (2008) untersuchten diese an Personen mit obstruktiven Schlafapnoesyndrom. Ziel der Studie war es, Unterschiede zwischen Mikroschlafphasen und Phasen ohne Mikroschlaf aufzuzeigen. Für die Standardabweichung zeigte sich, dass es zwischen den Phasen mit und ohne Mikroschlaf keine signifikanten Unterschiede in der Standardabweichung des Lenkradwinkels gab (1.9° vs. 1.7°). Jedoch ergab sich für die Lenkentropie ein signifikanter Unterschied. Die Lenkentropie stellt hierbei eine Kombination der Standardabweichung der Spurhaltung, der minimalen TLC sowie der Standardabweichung des Lenkradwinkels dar und beschreibt die Zufälligkeit der Lenkbewegungen. Für diesen Parameter zeigt sich während der Mikroschlafphasen ein geringer Wert als vor- bzw. nach diesen Phasen (117 vs. 231). Zudem fanden die Autoren, dass in Mikroschlafphasen die Geschwindigkeit signifikant geringer ausfiel (26.3 km/h vs. 26.5 km/h) und die Standardabweichung der Spurhaltung (SDLP) höher war (.16 cm vs. 14 cm).

Ein weiteres Lenkradwinkelsignal stellt das sogenannte Ellipsenkriterium (King, Mumford & Siegmund, 1998) dar. Hierbei wird die Lenkradwinkelgeschwindigkeit (ω) über den Lenkradwinkel (θ) abgetragen. Befindet sich der Fahrer innerhalb bestimmter Grenzen (z.B. Lenkradwinkel (θ) $< 7.5^\circ$, Lenkradwinkelgeschwindigkeit (ω) $< 50^\circ/\text{sek}$) der Ellipse, so wird der Fahrer als wach bezeichnet (Abbildung 7).

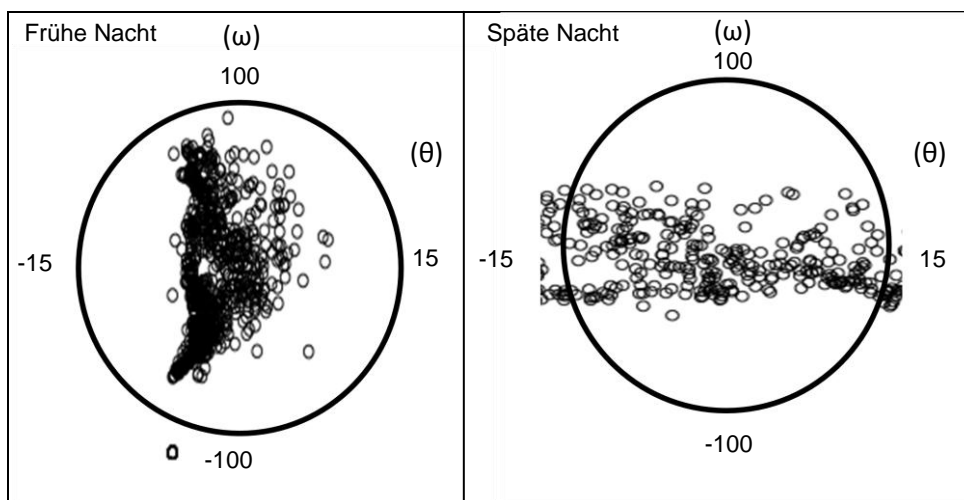


Abbildung 7: Ellipsenkriterium am Anfang einer Fahrt (links) und am Ende einer Fahrt (rechts) (zit. nach King et al., 1998, S. 875).

King, Mumford und Siegmund (1998) untersuchte 19 LKW-Fahrer auf einen Testgelände, die in der Nacht zuvor schlafdepriviert wurden. Es wurde die subjektive Müdigkeit sowie physiologische Daten (EEG; Herzratenvariabilität und Lidschlusshäufigkeit) der Teilnehmer erhoben. Des Weiteren wurden Fahrdaten aufgezeichnet (Geschwindigkeit, Abstand zum Vorderfahrzeug, Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit, Gaspedalwinkel und Gaspedalgeschwindigkeit und die Spurposition des Fahrzeuges). Aufgabe der Fahrer war es, so lange wie möglich zu fahren. Ein Versuchsleiter, der sich ebenfalls im Fahrzeug befand, hatte die Möglichkeit den

Versuch abubrechen, wenn sich eine sicherheitskritische Situation ergeben würde. Hinsichtlich der Ergebnisse zeigte sich, dass müde Fahrer öfter die Grenzen der Ellipse ($\theta > \pm 7.5^\circ$, $\omega > \pm 50^\circ/\text{sek}$) überschritten als dies bei wachen Fahrern zu finden war.

Ein weiteres Kriterium mit dem Müdigkeit aus dem Lenkverhalten bestimmt werden soll ist das „Time-Still-Kriterium“ (Galley, Hentschel & Kuhn, 2005). In diesem Kriterium wird nach Ruhephasen im Lenkradwinkelsignal innerhalb vorgegebener Grenzen und einer anschließenden starken Lenkreaktion gesucht. Die Ausprägung der Lenkruhephasen wird mit den Lenkreaktionen durch einen Gewichtungsfaktor verknüpft. Diese Werte werden abgespeichert und mit Werten, die in den nächstfolgenden Zeitintervallen gemessen werden, verglichen (Baselinemessung). Zusätzlich wird noch zwischen verschiedenen Lenkreaktionen unterschieden, die sich auf Grund von Ablenkung, Umweltbedingungen oder durch Müdigkeit ergeben. Im besten Fall ist der resultierende Gewichtungsfaktor unter Müdigkeit am Größten und somit gut als Müdigkeitslenkreaktion zu klassifizieren. Eingesetzt wird dieses System in den Modellen von Daimler. Untersuchungen hierzu sind keine veröffentlicht. Somit lässt sich über die Möglichkeit Müdigkeit anhand dieses Parameters zu erkennen bzw. zu unterscheiden keine Aussage treffen.

Als weiteres Kriterium zur Erkennung von Müdigkeit während der Fahrt wird die sogenannte „Steering Wheel Reversal Rate“ (SWRR) herangezogen. Dieser Parameter beschreibt die Anzahl an Lenkradumkehrungen (Übergang von links zu rechts und umgekehrt) über einen gewissen Zeitraum (meist 1 Minute) hinweg. Die SWRR gilt als einer der am häufigsten verwendeten Parameter zur Quantifizierung der Fahrerleistung (Östlund et al., 2004). Für die Berechnung der Anzahl an Lenkradumkehrung wird ein bestimmtes Kriterium festgelegt. Ein Reversal wird dann gezählt, wenn es eine bestimmte Gapsize überschreitet. Diese Gapsizes (in Grad des Lenkradwinkels) liegen, je nach Anwendungskontext, zwischen 2° und 10° (Fairclough und Graham, 1999). In der Literatur wird davon ausgegangen, dass eine große Gapsize der SWRR bei müden Fahrern öfter zu beobachten ist als dies bei wachen Fahrern der Fall ist (Fairclough & Graham, 1999). Allerdings ist keine Definition darüber vorhanden, ab wann eine Gapsize als groß bezeichnet werden kann (vgl. Fairclough und Graham, 1999; Östlund et al., 2004).

Untersucht wurde dieser Parameter von Schramm, Fuchs, Wagner und Bruder (2009). Sie untersuchten 46 Personen in einem Realfahrzeug auf einem Testgelände. Die Teststrecke bestand aus einem Parcours mit einer Länge von 1.9 km. Die Probanden wurden angewiesen, mit einer Geschwindigkeit von maximal 50 km/h zu fahren. Die Messung der Müdigkeit anhand der Fahrdaten fand jeweils auf einem geraden Teilabschnitt der Teststrecke statt. Die subjektive Müdigkeit der Teilnehmer wurde an einem bestimmten Teilstück der Strecke mit Hilfe der deutschen Fassung der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (Åkerstedt & Gillberg, 1990) von Niederl (2007b) alle zwei Minuten abgefragt. Der gesamte Versuch dauerte ca. drei Stunden. Schramm, Fuchs, Wagner und Bruder (2009) unterteilten die Probanden in zwei Müdigkeitsgruppen ($KSS \leq 7$ vs. $KSS \geq 8$). Als Gapsize, also jene Werte bei dem eine SWRR gezählt wurde, wurde ein Wert von 5.4° gewählt bzw. ergab sich durch die Aufteilung in die zwei Gruppen. Vergleicht man beide Gruppen hinsichtlich der An-

zahl an SWRRs, so zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen wachen (ca. 3 SWRRs) und müden Autofahrern (ca. 4.5 SWRRs).

Die SWRR wurde auch in anderen Kontexten untersucht. Thiffault und Bergeron (2003) analysierten die Auswirkung der Bebauung der Straßenumgebung (monoton vs. nicht monoton) auf die Steering Wheel Reversal Rate. Sie untersuchten 56 Fahrer, die jeweils die monotone Bedingung und die nicht monotone Bedingung durchfuhren. Es zeigten sich in der monotonen Bedingung mehr SWRRs im Vergleich zur nicht monotonen Straßenumgebung. Die Autoren schließen daraus, dass die Fahrer in der monotonen Bedingung müder waren als die Fahrer in der Vergleichsgruppe.

Die Detektion der Müdigkeit kann des Weiteren noch über die Anzahl an großen Lenkradbewegungen durchgeführt werden (Thiffault & Bergeron, 2003). Hierbei wird innerhalb einer bestimmten Zeitsequenz ein absoluter Wert des Lenkradwinkelsignals gezählt (im Gegensatz zur SWRR, bei der ein lokales Maximum überschritten werden muss) und verrechnet. Die Höhe des absoluten Lenkradwinkels, die erreicht werden muss um in die Berechnung mit einzugehen, hängt von der Fragestellung ab. In der Untersuchung von (Schramm et al., 2009) wurde der Wert bei 3° gesetzt. Vergleicht man hier wiederum beide Cluster ($KSS \leq 7$ und $KSS \geq 8$) so zeigte sich, dass sich die Anzahl an Lenkradbewegungen (gemittelt) über 3° signifikant zwischen den beiden Clustern unterschied. Die Mittelwerte im zweiten Cluster (müde Fahrer) lagen höher (ca. 5°) als bei den wachen Fahrern (ca. 3.5°) (Abbildung 8).

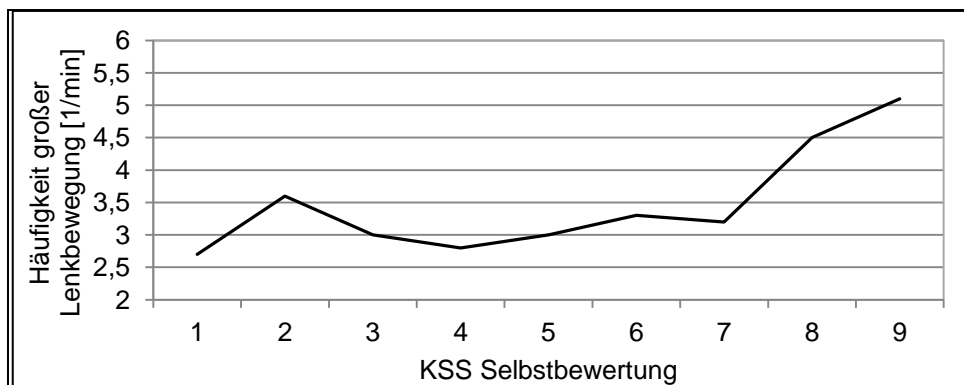


Abbildung 8: Häufigkeiten großer Lenkradbewegungen (zit. nach Schramm et al., 2009, S. 133).

Für den Lenkradwinkel steht demnach eine ganze Reihe an Möglichkeiten zur Verfügung, um Müdigkeit zu unterscheiden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Standardabweichung sowie der absolut größte Lenkradwinkelausschlag zur Bestimmung der Müdigkeit verwendet. Auf die Verwendung von Parametern mit einer Gap-size wurde verzichtet, da keine eindeutige Ableitung aus der Literatur möglich ist. Zudem wäre es hier auch möglich, die Definition von Müdigkeit durch einen z.B. Mediansplit vorzunehmen. Dies hätte allerdings den Nachteil, dass ein nicht vorab definiertes Merkmal für die Müdigkeitsreferenzierung verwendet werden würde.

Die Parameter des Lenkradwinkels und der Spurhaltung beziehen sich auf die Querregulation des Fahrzeugs. Da für die Fahrzeugführung natürlich auch die Längsregulation entscheidend ist, sollen auch diese Parameter betrachtet werden. Die Parameter der Längsregulation stellen hierbei vorrangig die Geschwindigkeitsmaße dar.

Die Erfassung von Müdigkeit während des Fahrens auf Grundlage der Geschwindigkeit ist ebenso wie die zuvor beschriebenen Parameter sehr schwierig. Zusätzlich hat dieser Kennwert einen großen Nachteil: Er ist stärker als die Anderen von äußeren Umgebungsbedingungen beeinflusst. Zwar sind die Spurhaltemaße und demzufolge auch die Lenkradbewegungen durch den Verlauf der Straße vordefiniert, bei der Geschwindigkeit zeigt sich jedoch zusätzlich, dass neben baulichen Gegebenheiten auch die Verkehrsdichte und natürlich die Straßenverkehrsordnung eine sehr starke Rolle spielen.

Trotz dieser Erschwernis wird zumindest in Fahrsimulatoruntersuchungen das Erkennen unterschiedlicher Müdigkeitsgrade aufgrund von Geschwindigkeitsparametern geprüft. Meist werden hierfür Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit von einem vorgegebenen Geschwindigkeitslimit als Parameter herangezogen (Arnedt et al., 2001; Boyle et al., 2008; Lenné, Triggs & Redman, 1998; Moller et al., 2006; Risser et al., 2000). Exemplarisch werden einige Studien zu diesem Fahrparameter vorgestellt.

In einer Untersuchung von Pizza, Contradi, Mostacci und Cirignotta (2004) wurden 10 Personen in einem Fahrsimulator unter dem Einfluss von Müdigkeit hinsichtlich ihres Fahrverhaltens und der Reaktionszeit auf einen wechselnden Stimulus untersucht. Es wurde an zwei Tagen getestet, wobei in einer Nacht ein normaler Schlaf erlaubt war, in der zweiten Nacht hingegen eine Schlafdeprivation vollzogen wurde. Insgesamt bestand die Versuchsreihe aus vier Szenarien, die an beiden Tagen zur gleichen Tageszeit (10, 12, 14 und 16 Uhr) durchgeführt wurden. Hierbei wurde jeweils zuerst der Multiple Sleep Latency Test (MLST) (Carskadon & Dement, 1977) durchgeführt. Im Anschluss daran wurde die subjektive Müdigkeit mit der Stanford Sleepiness Scale (SSS) (Hoddes, Dement & Zarcone, 1972) und einer visuellen Analogskala erhoben. Darauffolgend fuhren die Teilnehmer 30 Minuten eine monotone Strecke in einem Fahrsimulator. Hier wurden die Fahrdaten (Spurhaltung, Geschwindigkeit und Lenkverhalten) aufgezeichnet. Den Versuchspersonen wurde ein Geschwindigkeitsbereich vorgegeben. Dieser lag zwischen 80 km/h bis 120 km/h und sofern eine Änderung der Geschwindigkeit angezeigt wurde, sollten die Teilnehmer darauf reagieren. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Anzahl an Geschwindigkeitsüberschreitungen (3.8 vs. 10.5) mit zunehmender Müdigkeit signifikant erhöhte. Diese Ergebnisse zeigten sich sowohl für die unterschiedlichen Messzeitpunkte pro Tag (10, 12, 14 und 16 Uhr) als auch zwischen den beiden Tagen (mit und ohne Schlafdeprivation).

Eine weitere Untersuchung von Fairclough und Graham (1999) beschäftigte sich ebenfalls mit der Auswirkung von Müdigkeit auf das Geschwindigkeitsverhalten. Hierfür untersuchten die Autoren 64 Männer die in vier Gruppen (Kontrollgruppe, 4 Stunden Schlaf in der Nacht vor dem Versuch, Schlafdeprivation während der gesamten Nacht vor dem Versuch, Blutalkoholkonzentration von 0.8 ‰ bis 1.0 ‰) eingeteilt wurden. Jede Person wurde in dieser Untersuchung je einem Treatment zugeteilt. Die zu absolvierende Simulatorfahrt dauerte ca. 40 Minuten und wurde jeweils dreimal durchgeführt, wobei sich jede dieser Fahrten aus sechs unterschiedlichen Abschnitten zusammensetzte, welche in ihrer Reihenfolge jedoch unverändert blieben:

- (1) Freies Fahren (kein anderer Verkehr),
- (2) Folgen eines Vorderfahrzeuges, welches sich auf der linken Spur befand und konstant 96.5 km/h fuhr,
- (3) Überholen eines Fahrzeuges auf der eigenen Spur,
- (4) Folgefahrt und Überholen kombiniert,
- (5) Folgen eines Fahrzeuges, welches sinusförmig seine Geschwindigkeit moderat zwischen 88.5 km/h und 104.6 km/h auf der linken Spur in einem Zeitintervall von 30 Sekunden variierte und
- (6) Folgen eines Fahrzeuges, welches sinusförmig seine Geschwindigkeit moderat zwischen 80.5 km/h und 112.6 km/h auf der linken Spur in einem Zeitintervall von 30 Sekunden variierte.

Die subjektive Müdigkeit der Teilnehmer wurde mit der KSS (Åkerstedt & Gillberg, 1990) erhoben. Betrachtet man die Ergebnisse bezüglich der Geschwindigkeitsvariation, so zeigte sich, dass die Alkoholgruppe im Vergleich zu den beiden Gruppen mit Schlafdeprivation eine signifikant geringere Standardabweichung der Geschwindigkeit aufwies (6.7 km/h vs. 9.2 km/h). Zwischen den beiden Gruppen mit Schlafdeprivation konnten die Autoren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeitsvariation finden. Die Autoren fanden jedoch einen Time-On-Task-Effekt für alle Gruppen. Mit zunehmender Dauer der Fahrt stieg die Geschwindigkeitsvariation in den Gruppen an.

Baulk, Reid, Van den Heuvel, C.J. und Dawson (2008) untersuchten die Auswirkungen von Müdigkeit auf die Fahrperformanz und die Vigilanz. Hierfür wurden 15 Personen (8 Frauen, 7 Männer) hinsichtlich eines einfachen Reaktionstests und in einem Fahrsimulator untersucht. Ziel war es, eine Verbindung zwischen den beiden Messverfahren herzustellen und dadurch eine rasche und einfache Methode zu entwickeln um den Einfluss von Müdigkeit festzustellen. Hierfür wurden die Teilnehmer für insgesamt 26 Stunden kontrolliert wach gehalten. Innerhalb dieser Zeit mussten sie nach 4, 8, 18 und 24 Stunden eine jeweils 30-minütige Simulatorfahrt durchführen und anschließend einen psychomotorischen Vigilanztest absolvieren. Sowohl die Simulatorfahrt als auch den Vigilanztest absolvierten die Probanden dann ein zweites Mal nach einer 8-stündigen Schlafphase. Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der Geschwindigkeitsvariation, so zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrten.

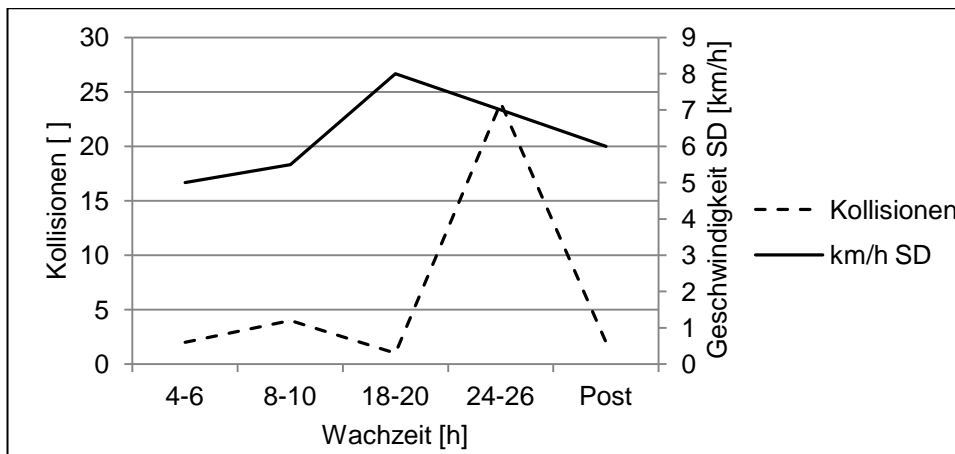


Abbildung 9: Geschwindigkeitsvariation und Kollisionen nach 4, 8, 18 & 24 Stunden (zit. nach Baulk et al., 2008, S. 399).

Wie aus Abbildung 9 ersichtlich steigt die Geschwindigkeitsvariation zu Beginn an, bis nach 20 Stunden die größte Variation erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt sinkt diese wieder und ist nach acht Stunden Schlaf wieder auf dem Niveau zu Beginn des Versuches.

Eine weitere Untersuchung wurde von Lenné, Triggs und Redman (1998) durchgeführt, die die Auswirkung von Schlafdeprivation auf das Geschwindigkeitsverhalten der Teilnehmer im Vergleich zu einer Kontrollbedingung prüften. 12 erfahrene Fahrer und 12 Fahranfänger nahmen an dem Versuch teil. Ihre Aufgabe war es, eine 20-minütige Strecke im Fahrsimulator um 8, 11, 14 und 20 Uhr zu fahren. Zusätzlich wurde noch eine Zweitaufgabe eingeführt, die darin bestand, auf ein sich veränderndes Display mit einem Pedal (im Fußraum) zu reagieren. An einem Versuchstag konnten die Teilnehmer die Nacht zuvor normal schlafen, vor dem zweiten Testtag wurden diese einer Schlafdeprivation unterzogen. Gemessen wurden die laterale Spurbabweichung, die Geschwindigkeitsvarianz und das Reaktionsvermögen in einer Zweitaufgabe. Die Ergebnisse zeigten eine erhöhte Standardabweichung der Geschwindigkeit und der Spurhaltung in der Fahrt nach der Schlafdeprivation (Abbildung 10). Des Weiteren zeigte sich für das Geschwindigkeitsverhalten ein Tageszeiteffekt. Die Abweichung war um 8 und 14 Uhr signifikant größer im Vergleich zu den anderen Messzeitpunkten. Die mittlere Geschwindigkeit wurde ebenfalls von der Tageszeit sowie der Schlafdeprivation beeinflusst. Es zeigte sich, dass die Teilnehmer die Sollgeschwindigkeit (80 km/h) in der Kontrollbedingung im Vergleich zur Schlafdeprivationsbedingung signifikant besser hielten. In der Schlafdeprivationsbedingung lag die mittlere Geschwindigkeit (Abbildung 10) der Teilnehmer unter 80 km/h. Zudem zeigt sich in Abbildung 10, dass es in der Bedingung nach der Schlafdeprivation um 14 Uhr zu einem signifikanten Absinken der mittleren Geschwindigkeit, jedoch zu einem Anstieg der Standardabweichung der Geschwindigkeit kommt.

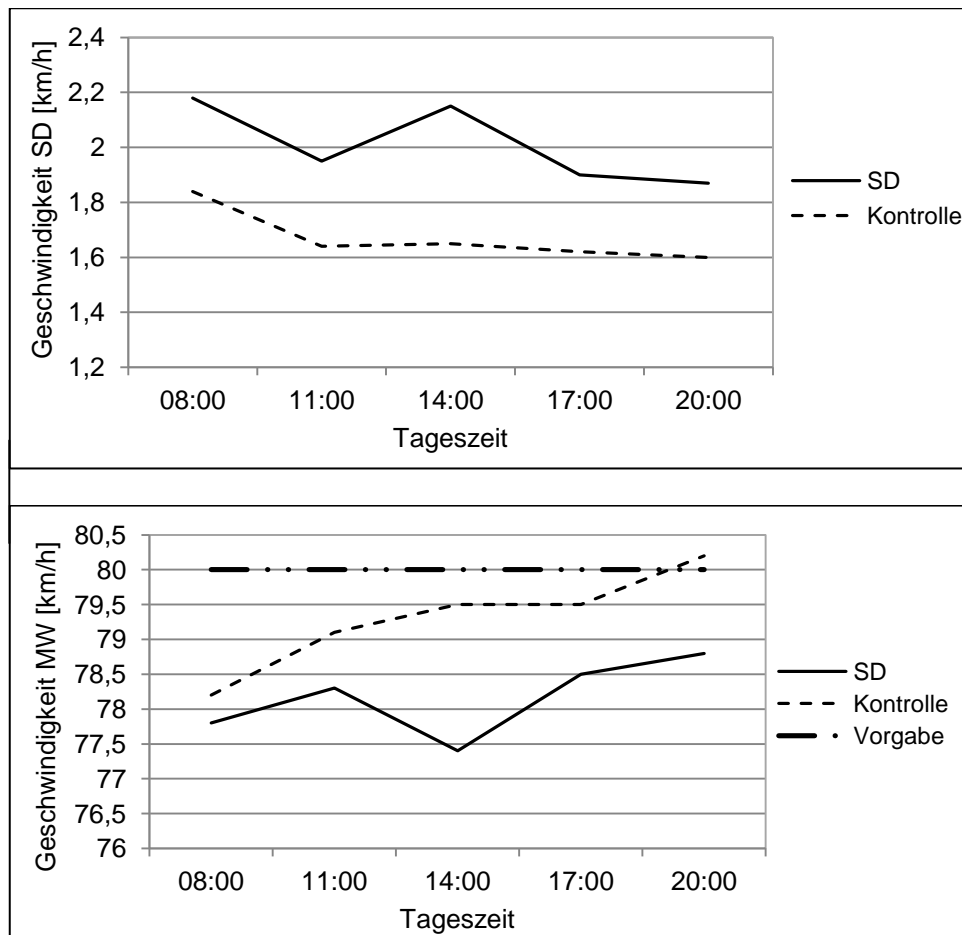


Abbildung 10: Standardabweichung (oben) und mittlere Geschwindigkeit (unten) in Abhängigkeit der Tageszeit und Versuchsbedingung (zit. nach Lenné, Triggs und Redman, 1998, S. 41).

Für die Zweitaufgabe zeigte sich ebenfalls, dass die Reaktionszeiten nach der Schlafdeprivation signifikant langsamer waren im Vergleich zur Kontrollbedingung (820 ms vs. 1100 ms).

Wie sich in den unterschiedlichen Studien zeigt, finden die Autoren zum Teil Unterschiede in den Fahrverhaltensparametern, Reaktionszeiten oder kognitiven Leistungsparametern. Demzufolge kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass Fahrparameter verwendet werden können, um unterschiedliche Müdigkeitsgrade zu unterscheiden. Allerdings zeigt sich in den beschriebenen Studien, dass die gefundenen Parameter zwar grundsätzlich ähnlich sind, der Wertebereich jedoch sehr streut. Zudem ist die Definition welches Fahrverhalten als müde definiert wird - vor allem bezogen auf die Spurhaltung - sehr weit gefasst. Dies zeigt sich beispielhaft in der Untersuchung von Philip et al., 2005a,b in der erst das vollständige Überfahren der Spurmarkierung mit dem gesamten Fahrzeug als müde definiert wird. Auch jene Parameter die mit sogenannten Gapsizes arbeiten sind durchaus kritisch zu betrachten. Hier ist vor allem jenes Vorgehen gefährlich, bei dem die Grenze für die jeweilige Gapsize erst nach dem Versuch, also auf Grundlage der vorliegenden Daten bestimmt wird. Hier würde eine vorherige klare Definition bzw. festgelegte Grenze für eine Unterscheidung eines wachen Fahrverhaltens bis hin zu einem müden Fahrver-

halten bei der Entwicklung eines Assistenzsystems sicherlich einen großen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit leisten.

Allerdings ist nur das Vorhandensein eines Unterschiedes zwischen „wachen“ und „schlafdeprivierten“ bzw. müden Teilnehmern noch kein Garant dafür, wie gut es möglich ist, Müdigkeit anhand dieser Daten auch zu erkennen.

Da in dieser Arbeit nicht nur nach Unterschieden zwischen wachen, leicht bzw. stark müden Fahrern geforscht werden soll, sondern auch die Möglichkeit einer Müdigkeitsdetektion besprochen wird, werden nachfolgend Studien berichtet, die bereits versucht haben Müdigkeit anhand von Fahrdaten zu detektieren.

2.7 Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalyse

Aus den bereits dargestellten Untersuchungen geht hervor, dass die Unterscheidung zwischen wachen und müden Fahrer auf Grundlage des Fahrverhaltens als nicht trivial anzusehen ist. Zudem stellt sich heraus, dass die Ergebnisse in der Literatur durchwegs inkonsistent (vgl. Tabelle 4; Liu et al., 2009) sind. Es kommt hinzu, dass in den beschriebenen Studien vorwiegend wache Fahrer entweder mit Fahrern mit Schlafentzug bzw. Fahrern mit Schlafstörungen verglichen werden, welche somit einen hohen Müdigkeitszustand aufweisen.

Ein ähnliches Bild findet sich auch im Kontext der Müdigkeitsdetektion wieder. Auch hier werden vorrangig wache Fahrer mit Fahrern verglichen, die ein sehr hohes Müdigkeitslevel aufweisen (vgl. Tabelle 5).

Die Detektion von Müdigkeit wird in sehr vielen Studien anhand von Fahrdaten durchgeführt (vgl. Tabelle 5), welche in diesem Kapitel näher erläutert werden. Es werden in einigen Untersuchungen zusätzlich zu den Fahrdaten auch andere Verhaltensdaten zur Müdigkeitsdetektion verwendet. Diese werden in Kapitel 2.9 besprochen.

Wie sich in Tabelle 5 zeigt, wird anhand verschiedenster Parameter mit Hilfe von unterschiedlichen Klassifizierungsverfahren versucht, verschiedene Müdigkeitszustände des Fahrers zu detektieren.

Tabelle 5: Müdigkeitsdetektion im Fahrkontext anhand von Fahrdaten.

| Autor | Stichprobe | Müdigkeits- erfassung, Induktion | Fahraufgabe & Sensoren | Müdigkeitsdetektion raten/Klassifikation |
|-------------------------------|------------|--|---|--|
| Feng, Zhang, & Cheng, 2009 | N = 8 | Skala von 0 (nicht müde) bis 4 (extrem müde), Keine | 15km Simulator- fahrt (AB), Lidbewegung, Lenkbewegung, Time-on-Task | - 89% wenig müde, - 99% extrem müde /Dempster-Shafer |

| | | | | |
|--|--------|--|---|---|
| Golz, Sommer, Trutschel, Sirois & Edwards (2010) | N = 14 | KSS, Versuch von 22 Uhr bis 8:30 Uhr am nächsten Tag | 8 x 40 Minuten Simulatorfahrt (AB), Testung vorhandener Müdigkeitssysteme | - bis 34% Fehlklassifikationen, Korrelationen zwischen KSS und Müdigkeitssystemen zwischen .12 bis .92 /PERCLOS |
| (Manstetten, 2008) | N = 20 | Selbststrating der Fahrer alle 30 Minuten, Fahrt ab 19 Uhr | 620km Realfahrt (Autobahn), Lenkwinkel (Deadband-Events), Spurhaltung (TLC) | Lenkwinkel: Sensitivität = .84, Spezifität = .99; Spurhaltung Sensitivität = 100 Spezifität = .99 /Signalanalyse |
| (Sahayadhas, Sundaraj, & Murugappan, 2012) | Review | Unterschiedliche Verfahren, je nach Studie | Fahrdaten (Lenkwinkel, Spurhaltung, Geschwindigkeit), Verhaltensdaten (Pupille, Lidparameter) und physiologische (EEG, EKG, EOG, EMG) Daten | - für Fahrdaten nur Korrelationen berichtet ($r = .19$ bis $.47$ mit KSS und Standardabweichung Spurhaltung) - 91% bis fast 100% für Verhaltensdaten - 84% bis 97% für physiologische Daten /Adaboost, Kalman-& Gaborfilter, FFT |

Anmerkung: EKG = Elektrokardiogramm, EOG = Elektrookulogramm, EMG = Elektromyogramm, FFT = Fast Fourier Transformation.

Die Verwendung von Fahrdaten zur Müdigkeitsdetektion wird von einigen Autoren verwendet. Allerdings schreiben Sahayadhas et al., 2012 den Fahrdaten eine schlechte Eignung zur Müdigkeitsdetektion zu da sie der Ansicht sind, dass „... many studies have determined that vehicle-based measures are a poor predictor of performance error risk due to drowsiness“ (S. 16943). Sie begründen ihre Aussage damit, dass die Auswirkungen von Müdigkeit auf das Fahrverhalten zu sehr mit anderen Beeinträchtigungen des Fahrers (z.B. Ablenkung) konfundiert sein können und dadurch keine sichere Erkennung von „reiner“ Müdigkeit gewährleistet werden kann. Der Aussage der Autoren stehen jedoch einige Untersuchungen gegenüber, die eine Müdigkeitsdetektion auf Grundlage von Fahrdaten durchgeführt haben und auch akzeptable Ergebnisse erzielten (Fairclough & Graham, 1999; Feng et al., 2009; Golz, Sommer, Trutschel, Sirois, & Edwards, 2010; Thiffault & Bergeron, 2003). Nachfolgend werden mit dem Ziel, einen Einblick in diese Methode zu gewährleisten, einige Studien zur Müdigkeitsdetektion beschrieben.

Eine dieser Studien ist jene von Feng et al., 2009. Sie untersuchten 8 Personen in einem Fahrsimulator. Die Fahraufgabe bestand darin, einen Rundkurs von 15 km Länge mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu befahren. Zusätzlich mussten die Teilnehmer mit einem gelben bzw. roten Knopf (am Lenkrad montiert) auf eine LED-Leiste reagieren, die entweder in gelb oder rot aufleuchtete. Die Müdigkeit der Fahrer wurde mit einer selbstentwickelten Müdigkeitsskala mit einem Wertebereich von 0 bis 4 (0 = not drowsy ... 4 = extremely drowsy) erhoben. Während der Fahrt wurde ein Video vom Gesicht der Fahrer aufgezeichnet, welches für eine videobasierte Müdig-

keitsbewertung herangezogen wurde. Aufgezeichnete objektive Parameter des Verhaltens waren die Lenkaktivität, die Lidbewegungen sowie die Fahrtdauer (Time-On-Task). Zur Berechnung der Müdigkeitsdetektionsleistung wurden die vorhandenen Müdigkeitswerte aus dem Videorating in drei Kategorien eingeteilt (not drowsy (0), some drowsy (1) & very drowsy (2)). Nach einer auf der Dempster-Shafer-Theorie basierenden Datenfusion wurden die objektiven Daten einer dieser drei Müdigkeitsklassen zugeteilt. Es zeigte sich, dass durch dieses Verfahren „some drowsy“ zu 89 % richtig erkannt wurde, „very drowsy“ sogar zu 99 %. Allerdings merken die Autoren an, dass die erzielten Ergebnisse hauptsächlich durch die Time-On-Task bedingt sind. Veränderungen der Reaktionszeiten auf den visuellen Stimulus sowie Einzelergebnisse werden nicht berichtet.

Eine Übersichtsarbeit über Müdigkeitsdetektionssysteme wurde von Golz et al. (2010) durchgeführt. Sie evaluierten drei kameragestützte Müdigkeitsdetektionssysteme auf ihre Genauigkeit hinsichtlich der Müdigkeitsdetektionsleistung. Als Referenzsysteme wurde das PERCLOS-Verfahren verwendet. Insgesamt absolvierten 14 Versuchspersonen eine nächtliche Simulatorfahrt, die durch 8 kurze Pausen (je ca. 10 min) unterbrochen war. Der Versuch begann um 22 Uhr und endete um 8:30 Uhr am nächsten Tag. Aufgezeichnet wurden neben den PERCLOS-Maßen durch die vorhandenen Müdigkeitssysteme noch EEG und EOG sowie die Fahrdaten der Versuchspersonen. Von den Fahrdaten wurde die Standardabweichung der lateralen Spurhaltung ausgewertet. Die subjektive Müdigkeit wurde mit der KSS erhoben. Zur Auswertung wurden die subjektiven Müdigkeitswerte in zwei Gruppen eingeteilt (leicht müde = $KSS < 7$, stark müde = $KSS > 7$). Durchgeführte Korrelationsanalysen ergaben je nach verwendetem Müdigkeitssystem Werte in den Bereichen von $r = .12$ bis $.89$ zwischen den Systemen und der Fahrleistung (Standardabweichung der lateralen Spurposition). Die durchgeführten Diskriminanzanalysen (KSS vs. Müdigkeitssysteme) zeigten Fehlklassifikationen von bis zu 34 % für die sehr starke Müdigkeit auf. Für die aufgezeichneten EEG bzw. EOG Daten ergeben sich hingegen nur Fehlklassifikationen bis zu 13 % für die beiden Müdigkeitsstufen.

Die Autoren merken an, dass die vorhandenen Müdigkeitsdetektionssysteme bei einer großen Datenmenge und langen Beobachtungseinheiten (> 40 Minuten) im Laborsetting gut funktionieren können. Zu bedenken geben Sie jedoch, dass die Detektionsleistung der Systeme im realen Versuchsetting aller Wahrscheinlichkeit nach nicht deckungsgleich mit den Laborergebnissen sein dürfte.

Eine Studie, die sich der Problematik der Müdigkeitsdetektion in einer realen Verkehrsumgebung angenommen hat, ist jene von (Manstetten, 2008). In dieser Studie wurde ein zuvor im Simulator entwickelter Müdigkeitsalgorithmus in einem realen Versuchsetting evaluiert. Die 20 absolvierten Versuchsfahrten auf einer Autobahn hatten eine Länge von je 620 km. Begonnen wurden sämtliche Versuche um 19 Uhr abends. Die Müdigkeit wurde alle 30 Minuten anhand einer Selbsteinschätzung der Fahrer erfasst, zudem wurden die Videos der Fahrer hinsichtlich Müdigkeit bewertet. Zusätzlich wurde das Lidschlagverhalten als Müdigkeitsindikator eingesetzt. Die durchgeführte Signalanalyse hinsichtlich des Lenkwinkelsignals und der Spurhaltung führte zu einer sehr guten Sensitivität (100 % für die Spurhaltung, 89 % für das Lenkverhalten) sowie zu einer guten Spezifität (98 % für die Spurhaltung, 99 % für das Lenkverhalten).

Fasst man diese Ergebnisse zusammen, so kann man davon ausgehen, dass es anhand von Fahrdaten möglich ist, Müdigkeitszustände des Fahrers zu detektieren. Nach Manstetten (2008) gelingt dies sogar mit einer sehr hohen Trefferwahrscheinlichkeit. Allerdings zeigt sich auch, dass nach der Studie von Golz et al., (2010) die Korrelationen zwischen einem Referenzsystem und anderen Müdigkeitssystemen teilweise sehr gering ausfällt. Gründe hierfür könnten beispielsweise sein, dass entweder das verwendete Referenzsystem (PERCLOS) nicht als „Ground truth“ angesehen werden kann oder dass es an den Berechnungsalgorithmen der getesteten Systeme liegt. Was sich allerdings zeigt ist, dass für eine Absicherung der Müdigkeitsdetektion meist nicht nur Fahrdaten, sondern noch weitere Ansätze bzw. Verfahren verwendet werden. Bevor diese Verfahren zur Müdigkeitsunterscheidung bzw. Müdigkeitsdetektion besprochen werden, sollen vorab die bisherigen Befunde in einem Überblick zusammengefasst werden.

2.8 Zusammenfassung Müdigkeit und Fahrverhalten

Veränderungen anhand von Müdigkeit im Fahrverhalten festzustellen scheint relativ gut zu funktionieren (vgl. Kapitel 2.6.1 und 2.7). Eine Veränderung im Fahrverhalten ist jedoch an und für sich noch nicht als gefährlich anzusehen. Erst wenn gewisse Grenzwerte überschritten werden, kann davon ausgegangen werden, dass es zu einem kritischen Ereignis kommen kann und die Verkehrssicherheit somit beeinträchtigt ist. Aus dieser Überlegung heraus werden die Veränderungen der Fahrparameter zusätzlich unter einem sicherheitskritischen Aspekt betrachtet. Zuerst werden die Querführungs-, dann die Längsführungsparameter besprochen. Zur besseren Übersicht werden die relevanten Parameter mit meistgefundenen Veränderungen in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Fahrverhaltensänderungen mit zunehmender Müdigkeit bzw. nach Schlafdeprivation oder während eines Mikroschlafereignisses.

| Studie | Fahrparameter | | | | | | | |
|--------|--------------------|------|-----|-----------------|----|--------------------|------------|--------------------------------------|
| | Spurhaltung | | | Geschwindigkeit | | | Lenksignal | |
| | Spurüberschreitung | SDLP | TLC | SD | MW | Max/Überschreitung | SD | Lenkaktivität (SWRR, max. Ausschlag) |
| 1 | ↑ | | | | | | | |
| 2 | ↑ | | | | | | | |
| 3 | | ↑ | | | | | | |
| 4 | | ↑ | | ↑ | | | | ↑ |
| 5 | | | | | ↑ | | | |
| 6 | | ↑ | ↓ | | | | ↑ | |
| 7 | | ↑ | | | ↓ | | | ↑ |
| 8 | | | | | | ↑ | | |
| 9 | | | | | | | | ↑ |
| 10 | | | | ↑ | | | | ↓ |
| 11 | ↑ | | | ↑ | | | | |
| 12 | | ↑ | | ↑ | ↓ | | | |
| 13 | | | | | | | | ↓ |
| 14 | ↑ | | ↓ | | | | | ↑ |
| 15 | | ↑ | | | | | | ↑ |

Anmerkung: Studie 1: Philip et al. (2005a); Studie 2: Philip et al. (2005b); Studie 3: Contradi et al. (2004); Studie 4: Risser et al. (2000); Studie 5: Moller et al. (2006); Studie 6: Paul et al. (2005); Studie 7: Boyle et al. (2008); Studie 8: Pizza et al. (2004); Studie 9: Schramm et al. (2009); Studie 10: Fairclough et al. (1999); Studie 11: Baulk et al. (2008); Studie 12: Lenné et al. (1998); 13: (Thiffault & Bergeron, 2003); Studie 14: Manstetten (2008); Studie 15: (Merat & Jamson, 2013); SDLP = Standardabweichung der Spurhaltung; TLC = Time to Line Crossing; SD = Standardabweichung; MW = Mittelwert; Max = Maximal; SWRR = Steering Wheel Reversal Rate; ↑ erhöht sich mit zunehmender Müdigkeit; ↓ verringert sich mit zunehmender Müdigkeit.

Dieser sicherheitskritische Aspekt spiegelt sich vor allem darin wieder, dass mit steigender Müdigkeit die Anzahl an Spurüberschreitungen steigt. Dies kann besonders hinsichtlich eines Spurverlassens, möglicherweise auch in den Gegenverkehr, zu einer kritischen Situation führen.

Die SDLP als Standardabweichung der Spurhaltung stellt hingegen ein geringeres Risiko da. Diese würde erst bei sehr großen Schwankungen zu einer Gefahr werden. Die berichteten Werte der Schwankungen bewegen sich um die 30 cm. Geht man von einer üblichen Spurbreite von mind. 3 m aus einer Fahrzeugbreite von ca. 1.8 m aus bleibt noch ausreichend Platz um diese Schwankungen ohne Sicherheitsrisiko „auszuführen und auszugleichen“. Diese stellen demnach zwar kein primäres Sicherheitsrisiko dar, werden jedoch sehr häufig für die Müdigkeitserkennung herangezogen.

Die TLC als Parameter zur Abbildung der Müdigkeit geht mit den Spurüberschreitungen einher. Zwar sind es grundsätzlich unterschiedliche Parameter, jedoch ist davon auszugehen, dass die beiden in einem gewissen Zusammenhang stehen (vgl. Manstetten (2008)). Erst wenn die TLC einen gewissen Wert unterschreitet, kann es zu einer Spurüberschreitung kommen. Der Grund, weshalb nicht in allen Studien die Spurüberschreitungen untersuchen auch die TLC Werte berichtet werden, liegt an

der Schwierigkeit diese zu messen. Allerdings stellt dieser Parameter ebenfalls ein sicherheitsrelevantes Verhalten dar. Vor allem auf relativ schmalen Straßenabschnitten kann es bei einer zu geringen TLC zu gefährlichen Situationen kommen. Der Grund dafür ist, dass die steigenden Schwankungen die Wahrscheinlichkeit für eine Spurüberschreitung erhöhen (vgl. Paul et al. (2006)). Zusätzlich zu der Spurhaltung zeigen sich Müdigkeitsauswirkungen auch im Lenk- und Geschwindigkeitsverhalten. Diese werden nachfolgend wieder aus der Perspektive der Relevanz für die Verkehrssicherheit besprochen.

Die Veränderung im Lenkverhalten ist differenziert zu betrachten. Die Erhöhung der SD stellt an und für sich noch kein sicherheitsrelevantes Verhalten dar. Die Erhöhung der „Lenkkorrekturen“ kann hingegen durchaus zu kritischen Situationen führen. So kann es durch eine erhöhte Lenkbewegung im Extremfall dazu kommen, dass das Fahrzeug ins Schleudern kommt und sich nicht mehr beherrschen lässt. Diese großen Lenkkorrekturen ergeben sich daraus, dass die Fahrer durch Müdigkeit sogenannte Mikrolenkbewegungen (vgl. Altmüller, 2007; Schmidt, 2010) unterlassen bzw. für einen bestimmten Zeitraum überhaupt kein Lenkverhalten aufzeigen und diese dann mit einer großen bzw. größeren Lenkbewegung korrigieren müssen. Als letzter Parameter wird der Längsführungsparameter Geschwindigkeit beschrieben.

Die Erhöhung der Standardabweichung der Geschwindigkeit mit steigender Müdigkeit, welche mit einer verminderten motorischen Kontrolle einhergehen kann, stellt primär noch kein Sicherheitsrisiko dar. Diese Erhöhung könnte auch daran liegen, dass die Fahrer ihre Geschwindigkeit seltener kontrollieren, und so auf ein Abweichen von der Sollgeschwindigkeit öfter reagieren müssen (vgl. Lenné et al. (1998)). Dieser Nachweis, dass eine verringerte Geschwindigkeitskontrolle zu größeren Schwankungen führt, fehlt jedoch bis dato. Als durchaus sicherheitskritisch ist im Vergleich zur Standardabweichung der Geschwindigkeit vor allem die Erhöhung der maximalen bzw. mittleren Geschwindigkeit anzusehen. Hierbei verlängert sich zum einen der Bremsweg, zum anderen verkürzt sich dadurch bei entsprechendem Straßenverlauf auch die TLC und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit die Spur zu verlassen.

Dieser Überblick über die Veränderungen im Fahrverhalten durch Müdigkeit zeigt, dass es aufgrund von Müdigkeit durchaus zu sicherheitskritischen Situationen kommen kann. Zudem zeigt sich in den vorangegangenen Kapiteln auch, dass teilweise unterschiedliche Herangehensweisen für eine Müdigkeitsunterscheidung bzw. Detektion verwendet werden. Einige Autoren versuchen durch eine variable Anpassung der Parametergrenzen eine bestmögliche Unterscheidung zwischen wachen und müden Fahrern zu erreichen (z.B. Veränderung der Gapsize). Andere wiederum legen bestimmte Grenzen der Kennzahlen (z.B. KSS-Wert > 7) vorab fest und teilen die Fahrer dann je nach erreichtem Kennwert in die entsprechende Gruppe ein. Hier ist die Ableitung der Größen der Kennzahlen meist schwer oder gar nicht nachvollziehbar und somit auch nicht replizierbar. Zudem finden sich durchwegs unterschiedliche Erhebungsinstrumente für die subjektive Müdigkeitserfassung (KSS, SSS, VAS, usw.), was die Vergleichbarkeit zusätzlich erschwert.

Aus diesem Grund erscheint es durchaus sinnvoll ein objektives Fahrverhalten als Müdigkeitsmaß einzusetzen. In der Literatur findet sich häufig die inadäquate Spur-

überschreitung als Maßzahl für Müdigkeit, jedoch stellt die Spurüberschreitung schon ein beträchtliches Unfallrisiko dar. D.h. bei einer Spurüberschreitung ist es vielleicht schon zu spät um den Fahrer auf seinen Müdigkeitszustand hinzuweisen. Würde man nun ein „früheres“ Kriterium festlegen, welches z.B. ein „ungefährlicheres“ Fahrverhalten widerspiegelt (z.B. Annäherung an einen bestimmten Bereich der Fahrspurmarkierung) wäre dies sicherlich ein erster wichtiger Schritt, um den Fahrer rechtzeitig zu warnen.

Als ebenfalls problematisch anzusehen ist, dass die Ergebnisse nicht konsistent sind. Am sichersten scheinen die Befunde für die Spurhaltung zu sein. Für das Lenk- und Geschwindigkeitsverhalten zeigen sich allerdings in den Studien sehr häufig Diskrepanzen (vgl. Tabelle 6). Zudem findet sich in vielen Fällen keine detaillierte Darstellung des Versuchsaufbaus (z.B. Straßenverlauf), der allerdings notwendig wäre um die Ergebnisse besser einordnen zu können. Ebenso fehlt meist gänzlich eine exakte Darstellung der Stichprobe.

Wie sich trotz dieser Anmerkungen zeigt, finden sich immer wieder Unterschiede im Fahrverhalten. Diese Unterschiede bzw. verschiedenartigen Verrechnungsmethoden dieser Unterschiede münden dann in einigen Studien zu einer Müdigkeitsdetektion. Wie sich in den Ergebnissen zur Müdigkeitsdetektion zeigt, ist diese, basierend auf Fahrdaten, als durchaus gut anzusehen (Manstetten, 2008). Möglicherweise könnte die Müdigkeitsdetektion jedoch weiter verbessert werden, wenn man zusätzlich zu den Fahrdaten weitere Parameter heranziehen würde (z.B. Blickverhalten, Sprachverhalten, usw. Sahayadhas et al., 2012). Da anhand dieser Verhaltensdaten sowohl Unterschiede zwischen verschiedenen Müdigkeitszuständen erkannt werden können, als auch eine Detektion möglich ist, werden nachfolgend zuerst wieder die Unterschiede und anschließend daran Studien zur Müdigkeitsdetektion vorgestellt.

2.9 Auswirkung von Müdigkeit auf weitere Verhaltensparameter

In den nachfolgenden Kapiteln werden durch Müdigkeit induzierte Unterschiede im Blick- Pupillen- und Sprachverhalten besprochen. Es wird hier jedoch nur ein kurzer Überblick über diese Möglichkeiten gegeben, da diese in vorliegender Arbeit nur in einem Laborsetting (Fahrsimulator) erhoben wurden. Es soll jedoch ein Einblick darüber gegeben werden, welchen zusätzlichen Nutzen weitere Verhaltensparameter für die Müdigkeitserkennung liefern können. Wie auch in den Kapiteln zu den Fahrdaten wird auch hier eine Übersichtstabelle dargestellt, welche die Veränderung der Verhaltensdaten unter Müdigkeitseinfluss aufzeigt (Tabelle 7). Nachfolgend werden wiederum auszugsweise Studien vorgestellt, die sich mit diesem Thema beschäftigen. Im Anschluss erfolgt wieder eine zusammenfassende Betrachtung.

Tabelle 7: Verhaltensparameter und ihre Veränderung unter steigender Müdigkeit.

| Studie | Verhaltensparameter | | | | | |
|--------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------------------------|---------------|
| | Blickverhalten, Augen-, Lidbewegung | | | | Sprache | |
| | Sakkaden | Fixationen | Lid | Pupille | Dauer | Fre- quenz |
| 1 | Dauer ↑ | Mittlere, Länge ↑ | Blinzeldauer MW ↑ | | | |
| 2 | Gesch. Dauer ↓ | | | | | |
| 3 | | | Perclos ↑ | | | |
| 4 | | | | | Vokallänge ↑ Wortlänge ↑ | Satz ↓ |
| 5 | | | | PUI ↑ | | |
| 6 | | | | PUI ↑ | | |

Anmerkung: Studie 1: Schleicher et al. (2008); Studie 2: Di Stasi et al. (2012); Studie 3: Merat et al. (2013); Studie 4: Krajewski (2007); Studie 5: Walzl (2009); Studie 6: Wilhelm et al. (2010); MW = Mittelwert; Gesch. = Sakkadengeschwindigkeit; PUI = Pupillen-Unruhe-Index; ↑ steigt mit zunehmender Müdigkeit; ↓ sinkt mit zunehmender Müdigkeit.

Dass Müdigkeit die kognitiven und physischen Fähigkeiten beeinflusst wurde bereits in dieser Arbeit (Kapitel 2.6) bereits beschrieben. In diesem Kapitel werden die Auswirkungen von Müdigkeit auf das Pupillen- bzw. Blickverhalten näher erläutert.

Prinzipiell ist hinsichtlich des Blickverhaltens zwischen Augen- und Blickbewegungen zu unterscheiden (Walls, 1962). Augenbewegungen stellen jene Bewegungen des Auges dar, die von außen beobachtbar sind. Die Aufzeichnung erfolgt z.B. mit einem Elektrookulogramm (EOG). Diese Augenbewegungen lassen jedoch noch keinen Rückschluss darüber zu, wohin der Blick der Person gerichtet ist. Um dies zu erfassen ist es notwendig nicht nur die Augenbewegungen der Person zu erfassen, sondern den tatsächlichen Blickpunkt der Person festzustellen. Der Blickpunkt der Person stellt hierbei den Punkt des schärfsten Sehens dar, welcher auf der Fovea Centralis (Arnold, 2007; Walls, 1962) abgebildet wird. Das Blickverhalten setzt sich aus einer Abfolge von Fixationen (die Betrachtung eines Objektes) und Sakkaden (die Blickzuwendung zu einem neuen Objekt) (Arnold, 2007; Diem, 2005; Leven, 1991; Schleicher, Galley, Briest, & Galley, 2008) zusammen.

Im Zusammenhang mit Müdigkeit beschäftigen sich die meisten Untersuchungen mit den Auswirkungen auf die Augenbewegungen oder vielmehr auf die Bewegungen des Augenlids (Galley & Schleicher, 2004; Golz et al., 2010; Hargutt, 2003; Hargutt, Körner, Krüger, & Maag, 2007; Schleicher et al., 2008). Ein sehr prominentes Verfahren für die Detektion von Müdigkeit über die Augenlider ist das sogenannte PERCLOS-Verfahren (Dinges, Mallis, Maislin & Powell, 1998; Skipper & Wierwille, 1986; Wierwille; Wierwille, Ellsworth, Wreggit, Fairbanks & Krin, 1994). PERCLOS wird definiert als „The percentage of time that the eyes were 80% to 100% closed over a one-minute interval“. (Wierwille et al., 1994, S. 59). Eine detaillierte Darstellung zur Augenlidbewegung im Zusammenhang mit Müdigkeit findet sich u.a. in Hargutt (2003). Nachfolgend werden die verschiedenen Parameter näher betrachtet.

2.9.1 Blickverhalten

Wie bereits beschrieben setzt sich das Blickverhalten aus Fixationen und Sakkaden zusammen. Eine Untersuchung, die den Einfluss von Müdigkeit auf das Blickverhalten und andere Parameter untersuchte, ist jene von Schleicher, Galley, Briest und Galley (2008). Sie untersuchten den Einfluss von Müdigkeit auf die Okulomotorik. Hierfür fuhren 129 Personen eine Fahrsimulatorstrecke mit einer Dauer von ca. zwei Stunden. Erhoben wurden neben Fahrparametern die Lidschlagdauer, der Lidöffnungswinkel, die Fixationszeiten, die horizontale und vertikale Augenbewegung sowie die Sakkadenlänge. Sämtliche Daten wurden mittels EOG erfasst. Zusätzlich wurden die Personen mit einer Kamera gefilmt um eine spätere objektive Bewertung der Müdigkeit zu ermöglichen. Im Intervall von 30 Minuten wurden die Teilnehmer nach ihrer subjektiven Müdigkeit befragt, welche sie auf einer Ratingskala (1: absolut müde ... 10: vollkommen wach) angeben mussten. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die mittlere Fixationszeit keinen signifikanten Zusammenhang mit Müdigkeit aufwies. Bezüglich der Sakkadenparameter zeigte sich für die Standardabweichung der Sakkadendauer ein signifikant positiver Zusammenhang mit der subjektiven Beurteilung der Müdigkeit. Bezüglich der Lidschlagparameter zeigten sich für die mittlere Lidschlagdauer und der dazugehörigen Standardabweichung durchwegs signifikant negative Zusammenhänge mit der subjektiven Müdigkeit. Für den Parameter Lidschlagintervall ergaben sich hingegen positive Korrelationen mit der subjektiven Müdigkeit. Aussagen über Zusammenhänge der gefundenen Ergebnisse für die Augen- bzw. Lidschlagbewegungen mit der Fahrleistung wurden in dieser Studie nicht postuliert. Zudem sind keine Aussagen über Zusammenhänge von Müdigkeit und horizontaler bzw. vertikaler Augenbewegung zu finden.

Andere Untersuchungen zum Thema Sakkaden finden ähnliche Effekte, jedoch bei anderen Kennwerten. So zeigte sich in der Studie von Di Stasi et al. (2012), dass sich die maximale Geschwindigkeit der Sakkaden nach einer Fahrtdauer von zwei Stunden in einem Simulator signifikant im Vergleich zu dem Zeitpunkt vor dem Versuch verringerte. Außerdem beobachteten die Autoren eine Erhöhung der Sakkadendauer. Di Stasi et al. (2012) schlossen daraus, dass sich vor allem der Geschwindigkeitspeak der Sakkaden als guter Indikator für eine Detektion von Müdigkeit eignen würde.

Wie sich hier exemplarisch zeigt, scheint die Sakkade ein relativ guter Indikator für Müdigkeit zu sein. Es finden sich in beiden Untersuchungen Effekte, die jedoch in unterschiedlichen Sakkadenparametern auftreten. Beide Autoren berichten jedoch über keinerlei Effekte der Müdigkeit auf die Fixationszeiten. Demzufolge scheint sich Müdigkeit nur im Geschwindigkeitsverhalten der Augenbewegungen zu zeigen, nicht - wie man es erwarten würde - in einer längeren Fixation. Somit scheint hier nur der motorische Anteil betroffen zu sein. Interessant ist hier, dass dies Ergebnissen gegenübersteht, dass Müdigkeit zu einer verlängerten Informationsverarbeitung (Mizuno et al., 2011; SafetyNet, 2009) und zu einem Augenstarren (Bergasa, Nuevo, Sotelo, Barea, & Lopez, 2008) führt, was sich auch in einer längeren Fixationszeit widerspiegeln müsste.

Zusätzlich zum Blickverhalten wird auch noch der sogenannte Pupillen Unruhe Index als Maßzahl für Müdigkeit verwendet. Dieser wird nachfolgend vorgestellt.

2.9.2 Pupillen Unruhe Index (PUI)

Die Veränderung des Pupillenverhaltens unter Müdigkeit wird als ein Ausdruck des Nachlassens der sympathischen Hemmung der parasympathischen Neuronen in den Edinger-Westphal-Kernen beschrieben und steht in Verbindung mit einer abnehmenden zentralnervösen Aktivierung (Wilhelm, 2006 bzw. Regen, 2009).

Der PUI beschreibt die Veränderung der Pupillengröße über einen definierten Zeitraum. Bei wachen Personen verändert sich das spontane Pupillenverhalten bei vollkommener Dunkelheit nahezu überhaupt nicht. Die Pupille oszilliert mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Amplitude von 0.3 mm um einen konstanten Pupillendurchmesser. Mit zunehmender Ermüdung der Person kommt es zu einer Abnahme der Pupillenoszillation bei einer gleichzeitigen Zunahme der Pupillendurchmesseramplitude (Regen, 2009; Wilhelm, Wilhelm, Lüdtkke, Streicher & Adler, 1998). Diese „Wellenbewegungen“ der Pupille werden nach Lowenstein, Feinberg und Loewenfeld (1963) als sogenannte „Fatigue Waves“ bezeichnet. Weeß et al. (2000) schlussfolgerten, dass eine stabile Pupillenweite mit einem hohen Aktivierungsniveau einhergeht, wohingegen eine niederfrequente Oszillation der Pupille mit Amplituden von bis zu mehreren Millimetern mit erhöhter Schläfrigkeit einhergehen.

Eine Untersuchung von Prasad, Choi, Weaver und Carley (2011) ging der Frage nach, ob sich Patienten mit Narkolepsie ($n = 20$) im Vergleich zu gesunden Patienten ($n = 56$) hinsichtlich des Pupillen-Unruhe-Indexes unterscheiden. Gemessen wurden der PUI, die Werte aus dem Multiple Sleep Latency Test (MSLT) (Carskadon & Dement, 1977), aus einer visuellen Analogskala sowie der Epworth Sleepiness Scale (ESS) (Johns, 1991) für die Erfassung der subjektiven Müdigkeit. Zusätzlich wurde noch der Psychomotor-Vigilanz-Test (PVT) (Dinges & Powell, 1985) vorgegeben. Die Ergebnisse zeigten, dass sich beide Gruppen in den meisten abhängigen Variablen signifikant unterschieden. Des Weiteren fanden die Autoren eine signifikant positive Korrelation des PUIs mit der subjektiven Müdigkeit (ESS) sowie eine negative Korrelation mit der durchschnittlichen Einschlafzeit im MSLT. Zusätzlich zeigte sich, dass in der gesunden Gruppe der PUI positiv mit der ESS, negativ mit der Einschlafzeit im MSLT und ebenfalls negativ mit der visuellen Analogskala korrelierte. Prasad, Choi, Weaver und Carley (2011) fassten zusammen, dass der PUI der einzige Parameter ist, der in der gesunden Gruppe durchgängig eine Korrelation mit der subjektiven Müdigkeit aufwies.

Wilhelm et al. (2010) untersuchten Tunnelarbeiter hinsichtlich ihrer Müdigkeit und der daraus resultierenden Unfallgefahr. Dabei wurden 35 Männer während einer 12-stündigen Schicht untersucht. Der PUI wurde zu drei Messzeitpunkten (6, 14 & 18 Uhr) erhoben. Die Autoren postulierten eine signifikante Veränderung des PUIs zwischen der 6 Uhr- und 14 Uhrmessung, wobei es zu einer Zunahme des PUIs im Laufe des Tages kam. Es zeigte sich jedoch nach der Messung um 14 Uhr keine signifikante Veränderung mehr zur Messung am Abend (18 Uhr). Die Autoren begründeten dies damit, dass zu Mittag das Schläfrigkeitsniveau schon als sehr hoch angesehen werden kann und sich dadurch keine Veränderung mehr ergibt. Einschränkend muss hier erwähnt werden, dass die subjektive Müdigkeit der Arbeiter nicht erhoben wurde und somit keine „Vergleichswerte“ vorlagen.

Auch an Fahrzeuglenkern wurden diesbezüglich Untersuchungen durchgeführt. Eine groß angelegte Studie wurde dabei auf österreichischen Autobahnen realisiert (Walzl, 2009). Hier wurden 1076 Messungen des PUIs an „normalen“ Autofahrern durchgeführt. Die Messungen fanden entweder in adaptierten Containern, Bussen oder in Gebäuden an Rastplätzen statt. Die Ergebnisse zeigten, dass rund 30 % der Teilnehmer einen „grenzwertigen“ bzw. „pathologischen“ PUI aufwiesen. Der Autor postulierte, dass diese Personen „nicht oder nur bedingt fahrtauglich waren“ (Walzl, 2009, S. 17). Allerdings wurde in der Studie nicht näher beschrieben, was unter einem grenzwertigen bzw. pathologischen PUI zu verstehen ist.

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass sich das menschliche Aktivierungsniveau, welches in Verbindung mit Müdigkeit gebracht werden kann (vgl. Wilhelm, 2006 bzw. Regen, 2009), mit Hilfe der Veränderung der Pupille abbilden lässt.

Neben dem Blick- bzw. Augenbewegungen finden sich in der Literatur Befunde, dass ein weiterer Parameter - das Sprachverhalten - in Zusammenhang mit Müdigkeit gebracht werden kann (z.B. Greeley et al., 2007; Harrison & Horne, 1997; Krajewski, 2007). Da in vorliegender Arbeit das Sprachverhalten der Probanden in einer Studie (Studie 4) erhoben wurde, sollen hier kurz die Grundlagen und Zusammenhänge mit Müdigkeit vorgestellt werden.

2.9.3 Sprachverhalten

In den letzten Jahren wurden immer mehr Geräte und Anwendungen - auch im Fahrzeug - entwickelt, die es ermöglichen, diese über Spracheingabe zu steuern. Auf Grund dieser Entwicklung wurden Überlegungen angestellt, Müdigkeit bzw. Zustände einer verringerten Aktivierung von Personen mittels Phonetik (gesprochener Sprache) zu erfassen.

Bevor auf die Auswirkungen von Müdigkeit auf die Phonetik eingegangen wird, soll vorab eine kurze Einführung in die Entstehung der Sprache bzw. Akustik der Sprache erfolgen. Grundsätzlich lässt sich der menschliche Sprechapparat in drei Segmente unterteilen:

(1) Hierbei stellen die Lunge, Bronchien und Luftröhre als Sublaryngalessystem die aerodynamische Energie (Luftdruck und Luftstrom) zur Verfügung (Catford, 1988).

(2) Das zweite System (Larynx) stellt der Kehlkopf dar. Hier wird mit Hilfe des Kehlkopfes der Luftstrom und Luftdruck durch Schwingungen der Stimmlippen in ein akustisches Signal geformt. Dieser Vorgang wird als Phonation bezeichnet (Kröger, 2007).

(3) Das dritten System (Supralaryngalessystem), bestehend aus Rachen, Mund- und Nasenraum, moduliert das Signal der Stimmlippen und gibt es über den Mund- und Nasenraum ab (vgl. Krajewski, 2007; Kröger, 2007).

Diese grundsätzliche Entstehung der Sprache bzw. der sprachlichen Äußerung bleibt unter allen Umständen gleich. Es wirken sich jedoch unterschiedliche Zustände der Person (z.B. Müdigkeit, Alkohol, etc.) auf die einzelnen Stadien der Sprachproduktion aus.

Diese Beeinflussung kann nach Krajewski (2007) durch eine Erweiterung des Quelle-Filter-Modells von Fant (1960) gut erklärt werden. Hierbei erweitert Krajewski (2007) das rein physiologische Modell der Sprachproduktion von Fant (1960) um die kognitiven Aspekte, welche für die Sprachplanung verantwortlich gemacht werden. Dieses kognitiv-phonetische Mediatormodell (Krajewski, 2007; Krajewski, Schnieder, Sommer, Batliner & Schuller, im Druck) bildet zudem auch die erwarteten auditiven Sprachproduktionsveränderungen ab, die durch Müdigkeit induziert werden können. Da in der vorliegenden Arbeit das Hauptaugenmerk auf die prosodischen Merkmale der Sprache gelegt wird, werden diese näher erklärt. Neben den prosodischen Merkmalen der Sprache werden noch die Artikulation und die Stimmqualität in einem phonetisch-linguistischem Konzept unterschieden. Eine detaillierte Darstellung darüber findet sich in Krajewski (2007).

Die prosodischen Merkmale lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Intensität: Die Lautstärke einer Äußerung wird dabei über die mittlere quadrierte Amplitude des Rohsignals innerhalb eines Zeitsegments berechnet. Bei der Messung ist zu beachten, dass der Abstand zwischen Aufnahmegerät und Sprecher sowie die Aufnahmerichtung konstant gehalten werden.
- Intonation: Die Tonhöhe, erzeugt durch die Vibrationsrate der Stimmlippen und die Sprechmelodie wird als Verlauf der fundamentalen Frequenz über die Maxima der Autokorrelation berechnet.
- Dauer: Die Dauer stellt verschiedene Kennwerte zur Verfügung. So können z.B. die Anzahl an Pausen, der Anteil an Pausen sowie die Dauer von Vokalen, Konsonanten oder ganzen Wörtern für die Detektion herangezogen werden (vgl. Krajewski, 2007).

Untersuchungen zur Auswirkung von Müdigkeit auf die prosodischen Merkmale der Sprache wurden bislang vielzählig unternommen (Greeley et al., 2007; Harrison & Horne, 1997; Krajewski, Batliner & Golz, 2009; Krajewski et al., im Druck; Krajewski et al., im Druck; Vollrath, 1994; Whitmore & Fisher, 1996).

Eine Studie von Greeley et al. (2007) beschäftigte sich mit dem Einfluss von Müdigkeit auf die Sprache. Hierfür wurden 31 Personen von drei unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen verglichen. Gruppe eins bestand aus sechs Probanden, welche 31 Wörter für insgesamt 34 Stunden im Intervall von sechs Stunden aufsagen mussten. Gruppe zwei bestand aus neun Personen, die unter dem Einfluss von Medikamenten standen und acht Personen, die ein Placebo verabreicht bekamen. Diese Gruppe musste im Intervall von drei Stunden acht vorgegebene Phrasen vorlesen. Insgesamt dauerte der Versuch 66 Stunden, ohne jegliche Schlafmöglichkeit zwischen den einzelnen Tests. Die dritte Gruppe bestand aus normalen Angestellten, die wiederum alle zwei Stunden acht vorgegebene Phrasen über eine Zeitspanne eines normalen Arbeitstages (acht Stunden) wiederholen mussten. Aufgezeichnet wurde neben den verbalen Äußerungen noch die Einschlaf latenz. Von den Sprachsamples wurden die Buchstaben „t“ und „p“ über eine Merkmalextraktion aus dem Sprachsignal extrahiert und jeweils in Zusammenhang mit dem Sprachsample am Anfang der Testreihe verglichen. Zusätzlich wurden die Zusammenhänge zwi-

schen der Wachzeit und den Sprachsamples berechnet. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Wachdauer respektive zunehmendem Schlafdruck, eine signifikante Korrelation von $-.89$ der Wachzeit mit „p“ ergab, mit „t“ diese Korrelation nur einen Wert von $-.67$ erreichte. Vergleicht man die Varianzaufklärung beider Buchstaben, so ergibt sich für das „p“ ein Wert von 79 % für das „t“ nur 45 %. Auf Grundlage dieser Ergebnisse schreiben die Autoren dem „p“ einen größeren Zusammenhang mit Müdigkeit zu als dem „t“.

Eine Studie von Whitmore und Fisher (1996) ging ebenfalls der Frage nach, ob sich unterschiedliche Müdigkeitszustände in der Sprache abbilden lassen. Für die Untersuchung wurden 12 Personen aus der US Air Force in drei Gruppen eingeteilt. Diese mussten drei 36-Stunden dauernde „Missionen“ in einem High-Fidelity-Simulator erfüllen, welche von Pausen unterbrochen waren. Im dreistündigen Rhythmus wurden die Sprache, kognitive Testdaten und die subjektive Müdigkeit erhoben. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Verringerung der Grundfrequenz der Sprecher sowie eine signifikante Verlängerung der Dauer der Wortäußerung über die verschiedenen Durchgänge hinweg, d.h. mit zunehmender Müdigkeit. Des Weiteren beschreiben die Autoren, dass die subjektive Müdigkeit und die Ergebnisse der kognitiven Tests den gleichen Verlauf aufwiesen wie die Sprachdaten.

Fasst man die Ergebnisse für das Sprachverhalten zusammen, so zeigt sich, dass mit zunehmender Müdigkeit eine Veränderung des Sprach- bzw. Sprechverhaltens eintritt (vgl. Tabelle 7). Meist zeigt sich dies dadurch, dass es zu einer zunehmenden Verlangsamung des Sprechverhaltens mit steigender Müdigkeit kommt, was zu einer längeren (Re)Produktionsdauer von Sätzen, einzelnen Worten oder Vokalen führt. Zudem zeigten Whitmore und Fisher (1996) auf, dass eine einfache Vermessung der Wortlänge für eine Abbildung der Müdigkeit herangezogen werden kann.

Wie auch im Kapitel zu den Fahrdaten wurden hier nur die Veränderungen zwischen unterschiedlichen Müdigkeitszuständen berichtet. Um das Bild zu komplettieren fehlt noch die Betrachtung der Möglichkeit zur Müdigkeitsdetektion anhand der vorgestellten Verhaltensdaten. Diese wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

2.10 Müdigkeitsdetektion durch Blick- und Sprachverhaltensanalyse

Wie auch im Kapitel zu den Fahrdaten lässt sich durch eine bloße Unterscheidung von unterschiedlichen Müdigkeitszuständen keine Aussage darüber ableiten, wie gut der jeweilige Müdigkeitszustand bestimmt werden kann. Tabelle 8 gibt einen Überblick darüber, wie gut bzw. mit welcher Sicherheit Müdigkeit anhand von Verhaltensdaten detektiert werden kann.

Tabelle 8: Müdigkeitsdetektion anhand von Verhaltensdaten im Fahrzeugkontext.

| Autor | Stichprobe | Müdigkeits- erfassung, Indukti- on | Fahraufgabe & Sensoren | Müdigkeitsdetektion raten/Klassifikation |
|--------------------------|------------|--|---|--|
| Sahayadhas et al. (2012) | Review | Unterschiedliche Verfahren, je nach Studie | Fahrdaten (Lenkwinkel, Spurhaltung, Geschwindigkeit), Verhaltensdaten (Pupille, Lidparameter) und physiologische (EEG, EKG, EOG, EMG) Daten | - für Fahrdaten nur Korrelationen berichtet ($r = .19$ bis $.47$ mit KSS und Standardabweichung Spurhaltung) - 91% bis fast 100% für Verhaltensdaten - 84% bis 97% für physiologische Daten /Adaboost, Kalman- & Gaborfilter, FFT |
| Vural et al. (2007) | N = 4 | Keine, Keine | 3 stündiges Fahren in einem Videospiel | - 92% korrekt /Adaboost |
| Krajewski (2007) | N = 24 | KSS, Untersuchung von 20 Uhr bis 4 Uhr | Keine, Stimm-analyse | - 80% für ein Wort - 83% für phrasale Einheit /Maschine-Learning Verfahren |
| Schleicher et al. (2008) | N = 129 | KSS, Keine | 2 stündigen Fahrt im Fahrsimulator, Lidschlagparameter, Sakkaden, Fixationen | - nur Korrelationen berichtet ($r = .061$ bis $.418$ für Lidschlagparameter, Sakkaden) |

Wie sich in Tabelle 8 zeigt, ist die Anzahl an Studien, die im Fahrkontext Müdigkeit detektieren und Entdeckungswahrscheinlichkeiten berichten, eher gering. Berichtet werden hingegen sehr oft Korrelationen der einzelnen Verhaltensparameter mit den jeweiligen Müdigkeitswerten der Teilnehmer (vgl. Hargutt, 2003; Schleicher et al., 2008). Bevor einzelne Studien auszugsweise vorgestellt werden, soll vorab noch eine Unterscheidung zwischen Verhaltens- und physiologischen Daten durchgeführt werden. Dies dient dazu, die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten in die entsprechende Kategorie einzuordnen.

Unter physiologischen Daten sind Daten zu verstehen, die z.B. durch EEG, EKG oder ähnliches gewonnen werden. Da in der vorliegenden Arbeit keine physiologischen Daten verwendet wurden, werden auch keine Studien in diesem Zusammenhang berichtet. Jedoch soll die erbrachten Detektionsleistungen im Hinblick auf Müdigkeit vorgestellt werden, um diese Verfahren hinsichtlich ihrer Güte einordnen zu können.

Die erbrachten Detektionsleistungen variieren zwischen 84 und 99 Prozent (Liu, Zhang, & Zheng, 2010), was als eine relativ gute bis sehr gute Erkennungsleistung hinsichtlich der Müdigkeitsdetektion zu werten ist. Genauere Angaben über diese Ansätze zur Müdigkeitsdetektion anhand von physiologischen Daten finden sich unter anderem bei Akin, Kurt, Sezgin, & Bayram, 2008; Hu & Zheng, 2009; Liu et al., 2010; Patel, Lal, Kavanagh, & Rossiter, 2011. Auf die Verwendung derartiger Daten wurde in vorliegender Arbeit aufgrund der fehlenden Messinstrumente verzichtet.

Vorgestellt werden hingegen Studien, die eine Müdigkeitsdetektion anhand von Verhaltensdaten durchgeführt haben. Hierunter fallen Daten, die z.B. aus den Blick-, Augen-, Lid- und Gesichtsbewegungen sowie aus dem Sprachverhalten gewonnen werden können. In vorliegender Arbeit wurden Blick- und Sprachdaten verwendet.

In einem Review von Sahayadhas et al., 2012 werden unterschiedliche Studien vorgestellt, die anhand von Verhaltensdaten, physiologischen Daten sowie auch Fahrdaten eine Müdigkeitsdetektion durchführten. Für die Fahrdaten werden in diesem Review nur Korrelationen berichtet. Diese liegen zwischen den Müdigkeitswerten der Fahrer und den korrespondierenden Fahrdaten zwischen $r = .19$ bis $.47$. Für die physiologischen Daten werden Erkennungsraten zwischen 84 bis 97 Prozent postuliert. Die Studien, die über Verhaltensdaten eine Müdigkeitsdetektion durchgeführt haben weisen Erkennungsraten zwischen 91 und nahezu 100 Prozent auf. Somit zeigt sich, dass anhand der Verhaltensdaten die „beste“ Müdigkeitsdetektion erreicht werden kann.

Eine Untersuchung ist jene von Krajewski (2007). Er untersuchte die Möglichkeit, Müdigkeit anhand von verbalen Äußerungen (Wortlänge, Vokallänge, Stimmfrequenz, usw.) zu detektieren. Hierfür wurden 24 Personen von 20 Uhr bis 4 Uhr früh getestet. Aufgabe der Probanden war es, vordefinierte verbale Äußerungen zu tätigen. Dies waren ein drei Sekunden lang gehaltenes „a“, eine Probanden-Intro Phase, eine Bildbeschreibung sowie neun Sätze, die im Kontext von Fahrerassistenzsystemen denkbar sind (z.B. „Rufen Sie den Notdienst an“). Die Erhebung der subjektiven Müdigkeit fand mit der KSS statt. Für die Auswertung wurden die gesprochenen Segmente der verbalen Äußerungen zuerst vorverarbeitet und dann mit einem Machine-Learning-Verfahren klassifiziert. Als Trainingssets für dieses Verfahren wurden 90 % der Daten verwendet, die restlichen 10 % stellten den Testdatensatz dar, welcher durch das Verfahren klassifiziert werden musste. Für die Müdigkeitsklassifikation wurden die KSS-Werte in „wach“ ($KSS < 5$) und „müde“ ($KSS > 5$) eingeteilt.

In den Ergebnissen (Tabelle 9) zeigt sich, dass eine korrekte Klassifizierung des dichotomen Müdigkeitszustandes (wach, müde), je nach verwendeter verbaler Äußerung, zwischen 73 und 92 % möglich ist. Diese Klassifikationswerte können durch einzelne Vokale (z.B. a oder o) aber auch durch die Klassifikation von gesamten Wörtern erreicht werden.

Tabelle 9: Müdigkeitsdetektion durch verbale Äußerungen (Krajewski, 2007).

| | Extrahiertes „a“ | | Extrahiertes „o“ | | Isoliertes „a“ | | Wort 1 | | Satz 3 | | Satz 9 | | Intro | | Bild | |
|-----|------------------|------|------------------|------|----------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|-------|------|------|------|
| | M | F | M | F | M | F | M | F | M | F | M | F | M | F | M | F |
| r | .69 | .60 | .48 | .46 | .77 | .31 | .58 | .37 | .70 | .57 | .57 | .51 | .73 | .37 | .61 | .42 |
| Acc | 88.3 | 83.5 | 81.6 | 77.5 | 91.6 | 73.0 | 85.0 | 75.5 | 83.3 | 83.3 | 85.0 | 81.5 | 92.0 | 76.9 | 90.0 | 77.0 |
| Spz | 94.1 | 88.2 | 88.2 | 82.3 | 96.3 | 85.0 | 100 | 85.2 | 76.4 | 97.0 | 94.1 | 94.1 | 77.7 | 90.3 | 95.6 | 85.0 |
| Set | 71.4 | 71.4 | 57.1 | 64.2 | 77.7 | 43.7 | 40.0 | 50.0 | 100 | 50.0 | 57.1 | 50.0 | 95.1 | 41.6 | 60.0 | 56.2 |
| PN | 88.8 | 88.2 | 83.3 | 84.8 | 92.8 | 79.0 | 83.3 | 80.5 | 100 | 82.5 | 84.2 | 82.0 | 95.1 | 80.0 | 91.6 | 82.9 |
| PP | 83.3 | 91.4 | 66.6 | 60.0 | 87.5 | 53.8 | 100 | 58.3 | 63.6 | 87.6 | 80.0 | 77.7 | 77.7 | 62.5 | 75.0 | 60.0 |

Anmerkung: M = Männer, F = Frauen, r = Korrelation, Acc = Prozent richtige Klassifizierung, Spz = Spezifität, Set = Sensitivität, PN = negativer prädiktiver Wert, PP = positiver prädiktiver Wert.

Wie sich zudem noch aus Tabelle 9 entnehmen lässt, zeigen sich für die Fehlklassifizierungen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Diese variieren zwischen ca. 40 % bis 70 %. Relevant ist dies hier, da dieser Wert jene Klassifizierung widerspiegelt, in der die Fahrer als müde beurteilt wurden als sie tatsächlich waren. Bezieht man das auf den Fahrkontext, so würde hier ein Assistenzsystem dem Fahrer rückmelden, dass er müde ist, obwohl er selbst keine Müdigkeit wahrnimmt. Das könnte zur Folge haben, dass das Vertrauen in das System abnimmt und der Fahrer das System deaktiviert.

Zusätzlich zu Stimmanalysen werden auch sehr oft Lid-, Kopf- bzw. Gesichtsbe-
wegungen zur Müdigkeitsdetektion herangezogen.

Eine dieser Studie ist jene von Vural et al., 2007. Sie untersuchten ob es möglich ist, durch Lidbewegungen, sowie durch weitere Parameter, die sich aus der Veränderung des Gesichtsausdrucks durch Müdigkeit zeigen, diese zu detektieren. Die Aufgabe der Probanden ($N = 4$) bestand darin, drei Stunden ein Autorennspiel zu spielen. Eine Müdigkeitserfassung anhand einer Befragung z.B. mit der KSS wurde nicht durchgeführt. Für die Einteilung in wach oder müde wurde das Abkommen des Fahrzeugs von der Fahrbahn bzw. ein Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug verwendet.

In den Ergebnissen zeigt sich, dass die extrahierten Features aus den Gesichtsvideos insgesamt zu einer korrekten Müdigkeitsdetektion von 96 % beitragen können. Für die Lidbewegung ergibt sich eine Detektionsleistung der Müdigkeit von 94 %. In Abbildung 11 sind die Lidbewegungen im wachen und nicht wachen Zustand einer Person abgetragen. Wie sich zeigt, verringert sich mit zunehmender Müdigkeit die Anzahl an Lidbewegungen.

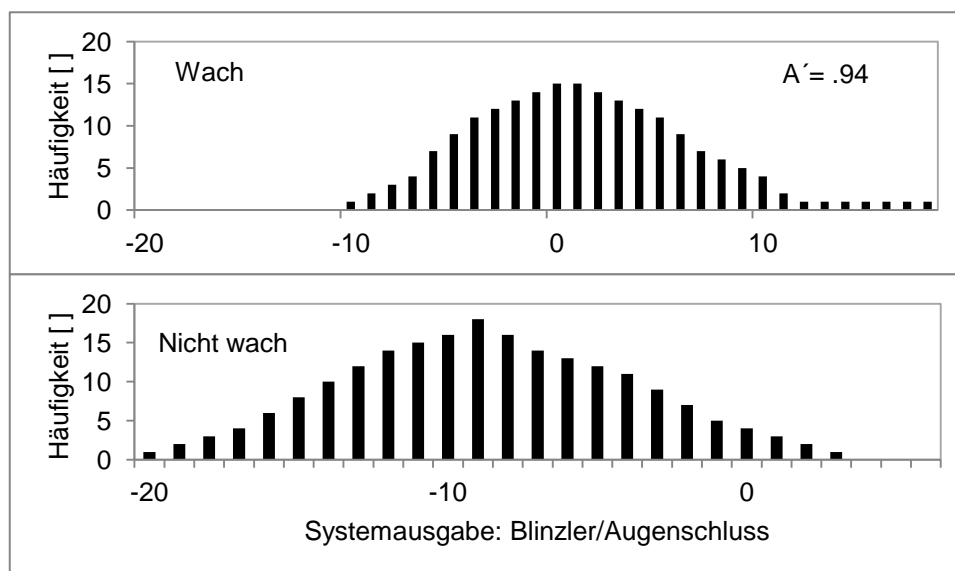


Abbildung 11: Histogramm für die Lidbewegung im wachen (oben) und nicht wachen (unten) Zustand (zit. nach Vural et al., 2012).

Kritisch anzumerken ist an dieser Studie jedoch, dass insgesamt nur vier Personen als Testkandidaten zur Verfügung standen. Zwar postulieren die Autoren eine Zwischensubjekterkennung der Müdigkeit von 90 %, dieser Wert kann aufgrund der geringen Stichprobe jedoch als nicht repräsentativ angesehen werden. Zudem sind

keine Aussagen darüber getätigt worden, wie hoch die Sensitivität bzw. Spezifität bei den verwendeten Verfahren sind.

2.11 Zusammenfassung und Fazit zur Auswirkung von Müdigkeit im Fahrzeugkontext

Fasst man die gesamten vorgestellten Auswirkungen von Müdigkeit sowohl auf der Ebene der Fahrdaten als auch auf der Verhaltensebene zusammen, so zeigt sich folgendes Bild:

Müdigkeit führt im Allgemeinen zu einer Verlangsamung von motorischen Reaktionen und Gedächtnisprozessen. Somit sind sowohl die motorische Ebene (Stabilisierungsebene) als auch die kognitive Ebene (Führungsebene) durch die Auswirkung von Müdigkeit betroffen. Zusätzlich zeigt sich, dass Personen den Versuch unternehmen, die Einschränkungen, die durch die Müdigkeit entstehen, zu kompensieren (vgl. Schmidtke, 1965). So tendieren müde Fahrer dazu, sich mehr zu bewegen bzw. zu strecken um sich mehr zu aktivieren und zu gähnen (vgl. Anund, Kecklund, Peters, & Åkerstedt, 2008; Gershon, Shinar, & Ronen, 2009; Horne & Reyner, 1996), um mehr Sauerstoff aufnehmen zu können. Diese Gegenmaßnahmen zeigen jedoch - wenn überhaupt - nur kurzfristig Wirkung (Gershon et al., 2009 & 2011). Steigt die Müdigkeit weiter an, kommt es unweigerlich zu Ausfallerscheinungen, die nicht mehr kompensiert werden können. Für einen Fahrer wäre eine derartige Ausfallerscheinung im schlimmsten Fall das Einschlafen und ein damit verbundener Unfall. Diese Befunde lassen sich gut in dem erweiterten und modifizierten Modell von Schmidt (2010) erklären (Abbildung 2).

Auch hier zeigt sich, dass durch die ausgeführten Aufgaben (z.B. monotone Autofahrt) Müdigkeit entstehen kann, was wiederum zu einer Abnahme der Aufmerksamkeit (vgl. May & Baldwin, 2009; Schmidt, 2010) führt. Für die Entstehung ist hier allerdings nicht nur die Aufgabe (z.B. monotone Fahraufgabe), sondern auch weitere Faktoren relevant (z.B. zirkadianer Rhythmus, Leistungshoch- bzw. tief, Zully, 1997; Stress oder Krankheit, Hargutt, 2003). So ist es wahrscheinlicher, um 3 Uhr nachts, im Leistungstief (vgl. Krajewski, 2007), in einer monotonen Situation (z.B. lange, wenig kurvenreiche Autobahn mit geringer Verkehrsdichte) in einen Unfall verwickelt zu sein als um 10 Uhr vormittags, wenn man sich im Leistungshoch auf einer viel befahrenen anspruchsvollen Straße befindet. Wie sich zeigt, sind viele Faktoren für das Auftreten von Müdigkeit verantwortlich. Um ein Assistenzsystem entwickeln zu können, muss man über das Wissen verfügen, welche Veränderungen durch Müdigkeit zustande kommen.

Eine Veranschaulichung der Veränderungen unter Müdigkeit findet sich in Tabelle 6 & 7 wieder. Hier sollen nachfolgend die auftretenden Defizite aufgezeigt werden und im Zusammenhang mit ihrer Gefährlichkeit für den Straßenverkehr beleuchtet werden.

Fahrverhalten:

Hinsichtlich des Fahrverhaltens zeigt sich, dass die Auswirkungen von Müdigkeit vorwiegend auf der Stabilisierungsebene zu finden sind. Für die Spurhaltung zeigen

sich vermehrt Spurüberschreitungen mit zunehmender Müdigkeit, ebenso wird beobachtet, dass die Fahrer stärker um ihre gewählte Idealspur schwanken. Zudem verringern müde Fahrer den Abstand zum rechten Rand und verkleinern auch die Zeit, die bis zu einer Spurüberschreitung vorhanden ist. Bezüglich der Lenkradwinkelmaße scheinen einfache Berechnungsmethoden (z.B. Mittelwert oder Standardabweichung) nur bedingt sensitiv auf Müdigkeit zu reagieren. Aus diesem Grund werden für den Lenkradwinkel vorrangig Verfahren verwendet, die nach bestimmten Kriterien suchen (z.B. Steering-Wheel-Reversal-Rate). So wird beispielsweise davon ausgegangen, dass mit steigender Müdigkeit die Lenkaktivität verringert wird um dann mit einer großen Lenkbewegung wieder korrigiert zu werden. Des Weiteren zeigen sich auch im Geschwindigkeitsverhalten Konsequenzen von Müdigkeit. Dort finden sich höhere Schwankung sowie höhere Mittelwerte um eine vorgegebene Geschwindigkeit. Die Auswirkungen auf die maximale Geschwindigkeit bzw. auf Geschwindigkeitsüberschreitungen scheinen jedoch nicht ganz eindeutig zu sein (vgl. Tabelle 6).

Blickverhalten, Pupillenverhalten:

Es zeigt sich, dass Müdigkeit vor allem zu einer Verringerung der Sakkadengeschwindigkeit führt, jedoch keine Auswirkungen auf die Fixationszeit ausübt, welche mit der kognitiven Verarbeitung der Information in Verbindung gebracht werden kann. Dieser Befund ist durchaus konträr, da davon ausgegangen wird, dass mit zunehmender Müdigkeit auch die kognitive Verarbeitung beeinträchtigt ist. Demzufolge sollte sich Müdigkeit auch in den Fixationszeiten finden lassen. Zudem ergibt sich jedoch durch die geringere Sakkadengeschwindigkeit ein längerer Zeitraum, bis Objekte für den Fahrer sicher erkannt werden können. Durch diese Verzögerung kann in weiterer Folge wertvolle Zeit verstreichen, bis eine entsprechende Reaktion des Fahrers eingeleitet wird.

Des Weiteren zeigt sich auch, dass die Pupille als guter Indikator im Zusammenhang mit Müdigkeit zu sehen ist. Hierbei scheint der Pupillenunruheindex ein sensibler Parameter für Müdigkeit zu sein. Für diesen Parameter finden sich mit zunehmender Müdigkeit höhere Werte wieder. Ob diese Veränderung der Pupille negative Folgen auf das Fahrverhalten bzw. auf die Erkennungsleistung von relevanten Reizen hat, ist in der Literatur bis dato nicht thematisiert worden. Erste Ergebnisse dazu von Reinprecht, Muhrer & Vollrath (2012) zeigen jedoch, dass die Erkennungsleistung unabhängig von der vorliegenden Müdigkeit ist.

Sprachverhalten:

Bezüglich des Sprachverhaltens sind noch sehr wenige empirische Befunde vorhanden. Diese weisen jedoch darauf hin, dass mit zunehmender Müdigkeit die Produktion ganzer Sätze, einzelner Wörter, Konsonanten oder Vokale längere Zeit in Anspruch nimmt als bei wachen Personen. Da es sich hier im Allgemeinen um einen rein mechanischen Vorgang handelt, der nur sehr geringe kognitive Ressourcen beansprucht ist davon auszugehen, dass sich Müdigkeit im Sprachverhalten hauptsächlich auf die mechanische Ebene auswirkt. Von einer negativen Auswirkung des Sprachverhaltens auf die Verkehrssicherheit ist daher nicht auszugehen.

Wie hier dargestellt, bilden sich die Konsequenzen von Müdigkeit in unterschiedlichen Parametern ab. Allerdings ist daraus noch nicht klar zu erkennen, ob diese Auswirkungen auch tatsächlich relevant für den Straßenverkehr sind. Zwar könnte z.B. eine höhere Geschwindigkeit als gefährlicher angesehen werden, ob diese dann aber tatsächlich zu einem Müdigkeitsunfall führt, ist unklar. Ebenso verhält es sich bei der Spurüberschreitung. Diese ist, alleine betrachtet, nicht unbedingt sicherheitsrelevant, wird jedoch spätestens dann bedeutend, wenn sich auf der benachbarten Spur z.B. ein LKW befindet oder der Fahrer überholt wird. Diese Beispiele ließen sich noch endlos fortsetzen, jedoch kann dadurch die Frage nach der Unfallrelevanz nicht abschließend geklärt werden. Um diese Frage zu klären, wird Müdigkeit und ihre Gefährlichkeit im Verkehrskontext nachfolgend betrachtet.

Die Kapitel zuvor zeigten, dass es für die Entstehung von Müdigkeit verschiedene Ursachen (z.B. Time-on-Task, Schlafmangel, Aufgabenschwierigkeit, Monotonie usw., vgl. Kapitel 2.4) gibt. Unabhängig von der Entstehung kann man festhalten, dass sich Müdigkeit nahezu immer negativ in der Aufgabenperformanz niederschlägt. Bezieht man dies auf das Verkehrsgeschehen, so zeigen sich durch Müdigkeit negative Konsequenzen auf das Fahrverhalten (Kapitel 2.6). Diese können bei einem übermüdeten Fahrers oft in einem Unfall münden (Kapitel 2.1). Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist die Zuordnung eines Unfalls, bedingt durch Übermüdung bzw. Müdigkeit, jedoch in den seltensten Fällen eindeutig festzustellen. Daher kann man provokant die Frage stellen, ob es überhaupt gefährlich, ist übermüdet zu fahren.

Dass dem so ist, belegen zumindest viele der durchgeführten Studien in den verschiedenen Fahrsimulatoren (vgl. Kapitel 2.6 bzw. 2.9.3). Nachteilig ist allerdings, dass die durchgeführten Studien die „Gefährlichkeit“ eines Fahrverhaltens jeweils auf eine andere Art und Weise bestimmen. So ist es in einer Studie gefährlich, wenn alle vier Räder über den Seitenrand gefahren sind, in einer anderen Studie reicht es, wenn zwei Reifen die Spurmarkierung überfahren, andere wiederum schreiben einer erhöhten Geschwindigkeit Gefährlichkeit zu, usw. Überträgt man diese Definitionen eines gefährlichen Fahrverhaltens auf ein reales Fahrgeschehen, so können durchaus sämtliche Verhaltensweisen als gefährlich eingestuft werden.

Doch was macht man nun mit der Erkenntnis, dass Müdigkeit im Straßenverkehr gefährlich ist? Kann man durch entsprechende Aufklärung und Schulungen die Fahrer auf das Gefahrenpotential dieses Zustandes aufmerksam machen? Haben diese Erkenntnisse dann auch wirklich Handlungsrelevanz bzw. werden diese tatsächlich im täglichen (Mobilitäts-)alltag umgesetzt? Werden sich Fahrer dadurch weniger oft müde ins Auto setzen oder bereits angetretene Fahrten unterbrechen?

Genau diese Zweifel öffnen den Markt für Assistenzsysteme. Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, sind auf dem Markt bereits erste Systeme vorhanden, die Müdigkeit im Fahrkontext erkennen bzw. erkennen sollen. Da diese Systeme verständlicherweise nur von Fahrzeugherstellern eingesetzt werden, ist eine Überprüfung, wie gut diese in der Realität tatsächlich funktionieren, schwierig. Einen Ansatz zur „Validierung“ von verschiedenen Systemen wurde bereits in der Arbeit von Golz et al. (2010) (vgl. Kapitel 2.7) vorgestellt. Wie sich in dieser Studie zeigte, sind die Ergebnisse als nicht zufriedenstellend anzusehen. Doch was ist der Grund dafür?

Glaubt man den Untersuchungen zur Müdigkeitsdetektion (vgl. Tabelle 5 bzw.

Tabelle 9), so werden dort Entdeckungswahrscheinlichkeiten von bis zu 100 % berichtet. Eine mögliche Erklärung für das „Versagen“ der Systeme in der Realität könnte darin begründet sein, dass sämtliche Systeme nicht in einem realen Setting entwickelt werden, sondern in Fahrsimulatoren. Dies zeigt sich auch in den angeführten Quellen (vgl. Kapitel 2.6) wieder. Fast 100 % der Untersuchungen wurden bzw. werden im Fahrsimulator durchgeführt. Der Grund hierfür ist relativ einfach: Der Sicherheitsaspekt. Es liegt auf der Hand, dass es nicht vertretbar wäre, Fahrer in der Realität mit einem derart hohem Müdigkeitsniveau fahren zu lassen, um die Systeme zu entwickeln. Aber warum funktioniert die „Übertragung“ der Assistenzsysteme aus dem Simulator in die Realität nicht? Dies soll im nächsten Kapitel beschrieben werden.

2.12 Entwicklung von Fahrerassistenz im Fahrsimulator und Realverkehr

Aufgrund von Befunden, die zeigen, dass im Labor entwickelte Systeme nicht zwangsläufig auch im realen Verkehrsgeschehen funktionieren müssen, soll hier kurz auf die Thematik Fahrsimulator vs. realer Straßenverkehr eingegangen werden.

Der Beginn der Entwicklung von Fahrerassistenz erfolgt nahezu immer in einem Fahrsimulator oder in einem Simulationstool (z.B. Simulink, Software in the Loop Verfahren). Diese Vorgehensweise ist sehr ökonomisch und es können damit sehr schnell neue Systeme oder Varianten eines Systems getestet werden. Ein großer Nachteil von einer Simulation bzw. einem Simulator ist allerdings - vor allem wenn es um die Entwicklung von Assistenz geht - die Übertragbarkeit der Ergebnisse bzw. des Verhaltens der Teilnehmer auf das reale Verkehrsgeschehen. Dies zeigt auch eine Studie von Hallvig et al., 2013. Hier zeigte sich, dass sich die Fahrer in der Realfahrtbedingung mit zunehmender Müdigkeit stärker Richtung Spurmitte orientierten und die Geschwindigkeit verringerten. Im Fahrsimulator fehlten diese Müdigkeitsauswirkungen gänzlich.

In der Studie von Philip et al. (2005b) zeigte sich ebenfalls ein unterschiedliches Fahrverhalten zwischen Realität und Simulation. Sie konnten zeigen, dass inadäquate Spurüberschreitungen in der virtuellen Fahrszenarie signifikant häufiger auftraten als im realen Verkehr. Allerdings zeigen die Autoren auch auf, dass sich der Verlauf der Müdigkeit in beiden Umwelten gleich darstellt. Bezüglich der Höhe der abgegebenen subjektiven Müdigkeitseinschätzungen zeigten sich nur am Anfang der Untersuchung signifikante Unterschiede, wobei in der Simulation höhere Müdigkeitswerte gefunden werden konnten. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Resultaten von Belz, Robinson und Casali (2004) sowie Hallvig et al. (2013), die im Vergleich zur realen Fahrt über höhere Müdigkeitswerte während der Simulationsfahrt berichteten. Auch in der Untersuchung von Davenne et al. (im Druck) konnten signifikante Unterschiede zwischen einer Realfahrt und einer Simulationsfahrt hinsichtlich der Fahrparameter gefunden werden. Hier zeigten sich ebenfalls mehr inadäquate Spurüberschreitungen im Fahrsimulator als im realen Straßenverkehr. Hinsichtlich der subjektiven Müdigkeitseinschätzung konnten zwischen den Fahrumgebungen keine Unterschiede festgestellt werden. Unabhängig von den Unterschieden im Fahrverhalten fanden Reinprecht, Muhrer und Vollrath (2011a) Unterschiede im Blickverhalten zwischen diesen beiden Verkehrsumgebungen. Hierbei zeigte sich, dass in der simulier-

ten Umgebung öfter der Blick zur Geschwindigkeitsanzeige geht sowie längere Blickdauern in die Peripherie zu beobachten sind.

Fasst man diese Befunde aus der Literatur zusammen, so zeigt sich, dass in der Simulation höhere Müdigkeitswerte zu erwarten sind. Zudem ist auch die Wahrscheinlichkeit von Spurüberschreitungen im Fahrsimulator größer als im Realverkehr. Die Ergebnisse können somit nicht analog übertragen werden. Trotz dieser Nachteile hat jede dieser Verkehrsumwelten auch gewisse Vorteile. Diese sollen nachfolgend beginnend mit dem Fahrsimulator dargestellt werden.

Davenne et al. (im Druck) beschreibt die Vorteile eines Simulators folgendermaßen:

- They provide the opportunity to safely study dangerous situations for the driver.
- The parameters relevant to the driving test can be recorded and experimental setups can be strictly controlled.
- They save time and money compared to real driving protocols.

Eine ähnliche Auflistung findet sich auch in Reinprecht, Muhrer und Vollrath (2011a). Zusätzlich führten die Autoren noch an, dass die Wiederholbarkeit der Situationen ein entscheidender Vorteil des Fahrsimulators darstellt. Des Weiteren werden auch Nachteile diskutiert. Die zwei größten Nachteile von Simulatoren sind:

- Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Realität
- Verhalten der Versuchspersonen

Zusätzlich kommen noch Effekte wie „Simulator Sickness“ (Hoffmann, Krüger & Buld, 2003) hinzu, wobei hier die Testpersonen aufgrund eines körperlichen Unwohlbefindens (z.B. Übelkeit, Schwindelgefühl) den Versuch abbrechen müssen. Durch derartige Einschränkungen ergeben sich oft längerer Versuchsreihen oder es sind grundsätzlich mehr Versuchspersonen im Vorfeld zu akquirieren um diese Ausfälle wieder auszugleichen. Diese Effekte finden sich in Versuchen im realen Umfeld nicht. Jedoch sind auch dort nachteilige Effekte zu erwarten. Reinprecht et al. (2011a) haben die Vor- und Nachteile eines Versuches in einem Realfahrzeug systematisch aufgelistet. Als größten Vorteil sehen sie die Übertragbarkeit der gefundenen Ergebnisse (externe Validität) auf ähnliche oder gleiche Verkehrssituationen sowie das reale Verhalten der Teilnehmer, welches nur durch das experimentelle Setting beeinträchtigt ist. Zusätzlich ist ein Ausfall von Versuchspersonen durch Übelkeit oder Schwindel nahezu nicht vorhanden. Außer den Vorteilen zeigen die Autoren auch Nachteile von Versuchen unter realen Bedingungen auf. Als nachteilig nennen sie den hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand für den Aufbau des Versuchsfahrzeugs, die Erfordernis einer Teststrecke bzw. eines abgesperrten Straßenstücks und die Reproduzierbarkeit von Verkehrssituationen. Zusätzlich kommen noch externe Störeinflüsse durch äußere Umweltbedingungen wie z.B. Wetter, Sicht, Verkehrsbedingungen zu tragen, welche nicht kontrolliert werden können.

Fasst man dies zusammen so zeigt sich, dass die Entwicklung eines Assistenzsystems die nur im Simulator stattfindet, aller Wahrscheinlichkeit nach nur unbefrie-

digende Erkenntnisse liefern wird. Daher ist es nahezu unverzichtbar auch reale Fahrdaten bzw. das reale Verhalten der Versuchspersonen in die Assistenzentwicklung mit einzubeziehen.

Diese Problematik der Entwicklung von Assistenz im Fahrsimulator vs. Realität stellt eine große Herausforderung dar. Innerhalb dieser Arbeit wird es nicht möglich sein sämtliche Aspekte dieser Unterschiede zu beleuchten. Es werden jedoch Analysen betrieben, die untersuchen werden, ob es zwischen einer Simulation und einer realen Fahrumgebung tatsächlich Unterschiede im Fahrverhalten gibt.

Wie sich bis jetzt gezeigt hat, scheint es durchaus möglich zu sein, Müdigkeit anhand von unterschiedlichen Daten zu erkennen. Zu berücksichtigen sind allerdings immer auch die unterschiedlichen Umwelten, in denen Untersuchungen durchgeführt werden. Wie sich hier zeigt, fallen auch in einigen Studien die Müdigkeitsbewertungen in Abhängigkeit des verwendeten Messverfahrens unterschiedlich aus. Zudem gibt es zwar einige wenige sehr prominente Verfahren zur Müdigkeitserfassung wie z.B. die KSS. Allerdings werden in vielen Studien immer wieder unterschiedliche Verfahren zur Müdigkeitserfassung eingesetzt.

Man könnte Müdigkeit zwar beispielsweise auch über ein Abweichen von der Fahrbahn operationalisieren, es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass dieses Abweichen nicht auf eine Ablenkung der Person zurückzuführen ist. Da die meisten Studien bestimmte Einteilungen der erhobenen Müdigkeitswerte der Personen mit den Fahrdaten in Beziehung setzen und daraus dann Schlussfolgerungen über Müdigkeitsauswirkungen ziehen, ist es besonders bedeutsam, auf eine sichere Müdigkeitsreferenzierung zurückgreifen zu können.

2.13 Müdigkeitsreferenzierung

Grundlage für die Referenzierung von Müdigkeit bilden meist nicht Fahr- oder Verhaltensdaten, sondern entweder subjektive Erhebungsmethoden (z.B. KSS) oder beobachtbare „objektive“ Methoden (z.B. Fremdbewertungsskala nach Wierwille). Eine adäquate Referenzierung der Müdigkeit und die dadurch mögliche korrekte Erkennung wäre ein maßgeblicher Entwicklungsschritt in der Forschung zur Fahrerzustandserkennung. Wie in den Kapiteln zuvor beschrieben, zeigt sich Müdigkeit in vielfältiger Art und Weise. Hinzu kommt, dass sich diese Veränderungen nicht nur im Fahrverhalten zeigen, sondern Müdigkeit an sich intra- und interindividuell (Wierwille et al., 1994) als auch im Verlauf (Schmidtke, 1965) sehr stark variieren kann. Diese Aspekte machen es zu einer Herausforderung, den Müdigkeitsstatus von Fahrern korrekt zu erfassen. Wie sich in den bereits vorgestellten Studien gezeigt hat, werden in einigen Untersuchungen subjektive Verfahren sowie auch beobachtbare bzw. „objektive“ Verfahren zur Müdigkeitsreferenzierung eingesetzt. Dies dienen oft als sogenannte „Ground truth“ Verfahren, d.h. es wird davon ausgegangen, dass dieser Wert den tatsächlichen Müdigkeitswert der Person widerspiegelt.

Es hat sich jedoch in verschiedenen Studien zur Müdigkeit gezeigt, dass dieser Wert nicht immer dem wahren Wert entspricht. Demzufolge besteht hier noch ein gewisser Klärungsbedarf hinsichtlich einer sicheren Referenzierung des aktuellen Müdigkeitszustandes einer Person. Wie grundsätzlich dem Problem begegnet wird, soll nachfolgend beschrieben werden.

2.13.1 Subjektive Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung

Subjektive Messverfahren zählen zu den am häufigsten eingesetzten Erhebungsinstrumenten für Müdigkeit und sind zudem ein einfaches, sehr ökonomisches Messinstrument (Cluydts, de Valck, Verstraeten & Theys, 2002; Shahid, Shen & Shapiro, 2010; Wierwille et al., 1994). Diese Verfahren können hinsichtlich ihrer Erhebungsmethode in verschiedene Kategorien eingeteilt werden (vgl. Belz, Gary, Robinson & Casali, 2004; Monk, 1987; Sahayadhas et al., 2012).

Die erste Kategorie stellt die Erhebung der Müdigkeit durch eine visuelle Analogskala (VAS) dar. Die Probanden werden gebeten, den momentanen Müdigkeitswert auf einer (meist) 10 cm langen Linie mit den Polen „wach“ und „müde“ (vgl. Brunner, 2009; Kos, Nagels, D'Hooghe, Duportail & Kerckhofs, 2006; Leung, Chan, Lee & Lam, 2004) zu markieren. Neben der bipolaren Darstellung gibt es für die visuelle Analogskala die Möglichkeit, die Frage auf nur einen Pol zu richten, und nach dem Grad der Müdigkeit oder den Grad der Wachheit zu fragen (unipolare Darstellung) (Volk, Dyroff, Georgi & Pflug, 1994) wie z.B. bei der Untersuchung von Philip et al. (2005b). Hier wurden die Probanden gefragt „describe how fatigued you are now“ (S. 475). Als Antwort sollten die Versuchspersonen einen senkrechten Strich auf einer Linie einzeichnen. Nach Monk (1987, 1989) haben visuelle Analogskalen den Vorteil, dass sie eine hohe Validität besitzen und auch, zumindest partiell, in der Lage sind den zirkadianen Rhythmus abzubilden. Nachteilig ist allerdings, dass für die Beantwortung immer eine „aktive“ Handlung des Befragten erfolgen muss. Dies kann vor allem in Kontext der Fahraufgabe als problematisch angesehen werden. Durch die „lange“ Erhebungsdauer des Müdigkeitszustands wird der Blick einstweilen von der Straße abgewandt. Hierdurch kann es zu gefährlichen Situationen kommen, da z.B. verkehrsrelevante Elemente übersehen werden könnten. Dieses Erhebungsinstrument eignet sich jedoch prinzipiell dafür, den aktuellen Müdigkeitszustand zu erfassen.

Die zweite Kategorie an subjektiven Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung stellen diverse Müdigkeitsskalen sowie Fragebögen zur Müdigkeit dar.

Müdigkeitsfragebögen zählen zu den retrospektiven Erhebungsinstrumenten welche im Allgemeinen die Einschlafneigung in bestimmten Situationen (z.B. Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie vor dem Fernseher einschlafen?) erfragen (z.B. Epingworth Sleepiness Scale (ESS) von Bloch, Schoch, Zhang & Russi, 1999; Johns, 1991). Auf Müdigkeitsfragebögen wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da mit diesen Instrumenten keine aktuelle Müdigkeitsreferenzierung möglich ist.

Von Interesse in dieser Arbeit sind die Müdigkeitsskalen. Hierbei bieten die Müdigkeitsskalen den Vorteil, dass sie den aktuellen Müdigkeitszustand einer Person zu einem definierten Zeitpunkt erfassen können. Zur Erfassung verwenden die meisten dieser Skalen Abstufungen von Müdigkeitsgraden (z.B. von sehr wach bis sehr müde) (Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (zit. nach Niederl, 2007a, S.98). (Abbildung 12) welche die Personen auf einer Skala angeben.

| | | |
|-----------------------|----|--|
| <input type="radio"/> | 1. | = sehr wach |
| <input type="radio"/> | 2. | |
| <input type="radio"/> | 3. | = wach |
| <input type="radio"/> | 4. | |
| <input type="radio"/> | 5. | = weder wach noch müde |
| <input type="radio"/> | 6. | |
| <input type="radio"/> | 7. | = müde, aber keine Probleme wach zu bleiben |
| <input type="radio"/> | 8. | |
| <input type="radio"/> | 9. | = sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend |

Abbildung 12: Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (zit. nach Niederl, 2007a, S.98).

Zu diesen Verfahren der aktuellen Müdigkeitsreferenzierung sind unter anderem zu zählen:

- (1) Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (9 bzw. 10 stufig) (Åkerstedt & Gillberg, 1990)
- (2) Samn-Perelli-Sleepiness Scale (FAT) (7 stufig) (Samn & Perelli, 1982)
- (3) Stanford Sleepiness Scale (SSS) (7 stufig) (Hoddes et al., 1972)
- (4) Subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS) (5x3 stufig) (Reinprecht et al., 2011b) (Neuentwicklung, siehe Kapitel 3.1)

(1) Die KSS misst über eine neunstufige Skala den aktuellen Müdigkeitsgrad der Teilnehmer. Zur Messung wird die Person entweder durch einen Versuchsleiter oder eine anderweitigen Aufforderung dazu aufgefordert, ihren aktuellen Müdigkeitsgrad anzugeben. Die Angabe erfolgt hierbei meist in Form einer Zahl zwischen 1 (sehr wach) und 9 (sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend). Die vorhandenen Beschriftungen jeder 2-ten Zahl sollen die Einordnung in einen bestimmten Müdigkeitszustand für den Teilnehmer erleichtern. Nachteil an diesem Verfahren ist darin zu sehen, dass eine reine Vorgabe von Zahlen dazu führen könnte, dass die höchste Zahl (9) nur sehr selten verwendet wird. Allerdings fehlen bis dato noch Belege dazu. Der Vorteil besteht, speziell bei diesem Verfahren darin, dass es sehr häufig eingesetzt wird (vgl. Åkerstedt, Connor, Gray, & Kecklund, 2008; Kaida et al., 2006; Golz et al., 2010) und somit recht gut validiert ist.

(2) Die Samn-Perelli-Sleepiness-Scale (Abbildung 13) beschreibt zehn unterschiedliche Stadien von Müdigkeit, welche auf einer dreistufigen Skala zu beantworten sind (Niederl, 2007a; Samn & Perelli, 1982). Die erreichten Punkte werden aufsummiert. Dieser Wert (von 0 = „hellwach“ bis 20 = „todmüde“) wird dann in vier Müdigkeitsstufen eingeteilt (Keine Ermüdung, Milde Ermüdung, Moderate bis erhebliche Ermüdung und Erhebliche Ermüdung).

| Item | Besser (0) | Genau (1) | Schlechter (2) |
|------------------------|------------|-----------|----------------|
| 1. sehr munter | | | |
| 2. äußerst müde | | | |
| 3. durchaus frisch | | | |
| 4. leicht erschöpft | | | |
| 5. unternehmungslustig | | | |
| 6. ziemlich frisch | | | |
| 7. abgeschlafft | | | |
| 8. sehr erfrischt | | | |
| 9. ziemlich erschöpft | | | |
| 10. ausgepumpt | | | |

Abbildung 13: Samn-Perelli-Sleepiness-Scale (zit. nach Niederl, 2007, S. 96).

(3) Die Stanford Sleepiness Scale verwendet ein ähnliches Konzept wie die KSS, jedoch nur sieben Abstufungen (Abbildung 14) (Hoddes et al., 1972) zur Müdigkeitsreferenzierung.

| Schlafgrad | Ratingskala |
|--|-------------|
| Sich aktiv, vital, aufmerksam oder wach fühlen | 1 |
| Funktionieren auf hohem Niveau, aber nicht auf der Höhe; konzentrationsfähig | 2 |
| Wach, aber entspannt, ansprechbar aber nicht vollkommen aufmerksam | 3 |
| Etwas träge, leicht herabgesetzte Aufmerksamkeit | 4 |
| Träge, keine Lust wach zu bleiben, grundsätzlich verlangsamt | 5 |
| Schläfrig, schummrig, gegen Schlaf kämpfend, bevorzuge zu liegen | 6 |
| Nicht gegen den Schlaf kämpfend, schlafe gleich ein | 7 |
| Eingeschlafen | X |

Abbildung 14: Stanford Sleepiness Scale (zit. nach Hoddes et al., 1972).

Wie sich hier zeigt, sind vor allem die Abstufungen im wachen Bereich (Werte von 1 bis 3) sehr ähnlich zu denen der KSS. Somit sind hier auch ähnliche Ergebnisse vorzufinden. Nachteil ist, dass für die eigentliche Müdigkeitsbewertung nur noch vier Stufen (4-7) verbleiben.

(4) Ein weiteres neues Verfahren, welches aus einer subjektiven sowie auch aus einer objektiven Erhebungsmethode besteht ist die subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS) (Reinprecht et al., 2011b).

Die Beschreibung dieser Skala wird, da sie im Zuge dieser Arbeit entwickelt wurde, im empirischen Teil dargestellt.

Untersuchungen mit den dargestellten subjektiven Erhebungsmethoden für Müdigkeit wurden zahlreich durchgeführt (vgl. Barwick, Arnett & Slobounov, 2011; Davenne et al., im Druck; Desmond & Matthews, 2009; Di Stasi et al., 2012; Hirvonen et al., 2010; Li, He, Fan & Fei, 2012; Reinprecht et al., 2011a, 2011b). Exemplarisch soll eine Studie kurz vorgestellt werden die die subjektive Müdigkeitsbewertung verwendet. Ziel ist es aufzuzeigen, dass es auch durch eine subjektive Müdigkeitsreferenzierung gelingen kann, Müdigkeitsverläufe (z.B. durch zirkadiane Schwankungen) zu erfassen.

In der Studie von Ferguson et al. (2011) wurde die Auswirkung der Tageszeit (zirkadianer Rhythmus), der Schlafdauer und der Wachdauer auf die subjektive Müdigkeitseinschätzung untersucht. Hierfür nahmen 29 Versuchspersonen an einer von zwei Untersuchungsreihen teil. Die Erste bestand aus einem 28 Stunden langen asynchronen Schlaf-Wachzyklus (4.7 h Schlaf, 23.3 h Wachzeit), die Zweite aus ei-

nem moderaten Schlaf-Wachzyklus (7 h Schlaf, 21 h Wachzeit), ebenfalls mit einer Gesamtdauer von 28 Stunden. Beide Untersuchungsreihen erstreckten sich über sieben Tage. Die subjektive Müdigkeit wurde jeweils vor und nach jeder Schlafperiode mit der Sman-Perelli-Skala (Samn & Perelli, 1982) erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass der zirkadiane Rhythmus einen signifikanten Einfluss auf die subjektive Müdigkeitseinschätzung sowohl vor als auch nach der Schlafphase ausübte. Die Müdigkeitseinschätzungen vor der Schlafphase waren um ca. 8 Uhr am höchsten und gegen Mitternacht am geringsten. Für die Müdigkeitserhebung nach der Schlafphase zeigte sich, dass die Ratings um 4 Uhr am höchsten waren, um Mitternacht am geringsten. Des Weiteren fanden die Autoren einen signifikanten Effekt der Schlafzeit auf die Müdigkeitsbewertung nach der Schlafphase. Sowohl bei der Pre- als auch bei der Postmessung der Müdigkeit zeigten sich signifikante Effekte des Untersuchungstages, wobei es hier zu einem Anstieg der Müdigkeitsbewertung über die Tage hinweg kam. Diesen Effekt interpretieren die Autoren als Kumulation des Schlafentzuges während des Experiments.

Allerdings zeigt sich in der Literatur, dass die Selbstbewertungsskalen mit einigen Problemen behaftet sind.

Zwar zeigen die Verfahren eine hohe Validität (vgl. Kaida et al., 2006) auf, jedoch auch eine hohe Variabilität in der subjektiven Bewertung der Müdigkeit im Zusammenhang mit zusätzlichen Messdaten (z.B. Leistung, Merkfähigkeit, etc.) (vgl. Belz et al., 2004; Moller et al., 2006; Schmidt, 2010). Damit wird auch die Schwierigkeit, die mit der subjektiven Erhebung von Müdigkeit verbunden ist, sichtbar. Jede Person bewertet ihren Müdigkeitszustand anders, d.h. wenn z.B. zwei Teilnehmer die gleichen Leistungseinbußen zeigen, dann bewertet sich Kandidat 1 vielleicht als „wach“, wohingegen sich Kandidat 2 als „müde“ bezeichnet. Dies stellt einen der größten Nachteile im Umgang mit subjektiven Müdigkeitserhebungen dar. Natürlich steht dem Gegenüber der Vorteil, dass die Erhebung sehr ökonomisch erfolgen kann und zudem, zumindest aus Sicht der Versuchsperson, die höchste Validität aufweist. Um eine bestimmte „Absicherung“ der subjektiven Müdigkeitsreferenzierung zu erhalten und damit den beschriebenen Nachteilen entgegen zu wirken, wurden Verfahren entwickelt die eine objektivere bzw. beobachtbaren Müdigkeitsreferenzierung ermöglichen.

2.13.2 Objektive Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung

Beobachtbare Erhebungsmethoden zur Müdigkeitsreferenzierung versuchen anhand von „von außen“ beobachtbaren Merkmalen den aktuellen Müdigkeitszustand einer Versuchsperson zu quantifizieren. Hierbei werden meist Merkmale für die Beurteilung herangezogen die mit Müdigkeit assoziiert sind. Diese werden von einem erfahrenen Bewerter bzw. Rater notiert. Derartige Müdigkeitsmerkmale die notiert werden können z.B. sein:

- Reduzierte Mimik & Körperhaltung/bewegung (z.B. Wierwille & Ellsworth, 1994)
- Kopfnäigung & Kopfbewegung (z.B. Wright, McGown & A., 2001)
- Gähnen (z.B. Baenninger, Binkley & Baenninger, 1996)

- Langsamer Lidschluss (z.B. Galley & Schleicher, 2004)
- Reiben und Kratzen der Augen bzw. des Gesichts
- Strecken oder Dehnen des Körpers (z.B. Wierwille & Ellsworth, 1994)

Diese Anzeichen münden in ein „Scoringverfahren“, wobei in den meisten Verfahren bestimmte Anzeichen (z.B. Wegnicken des Kopfes bei geschlossenen Augen = sehr hohe Müdigkeit vs. aktives Herumschauen in der Verkehrsumgebung = keine bzw. sehr geringe Müdigkeit) zu einer bestimmten Müdigkeitsstufe zusammengefasst werden (Wierwille & Ellsworth, 1994). Die Beurteilung der Anzeichen erfolgt in bestimmten Zeitabschnitten, welche unterschiedlich definiert sein können. Für diese zeitbasierte Bewertung sind verschiedene Verfahren anwendbar.

Exkurs: Zeitbasierte Müdigkeitsreferenzierung

Zeitkontinuierliche Bewertungsverfahren notieren während der gesamten Beobachtungszeit (z.B. 2 Stunden) jedes Müdigkeitsmerkmal der Versuchsperson, welches im Anschluss daran ausgewertet wird. Diese Verfahren erfordern zum einen einen hohen zeitlichen Aufwand, da die Bewertung mindestens so viel Zeit in Anspruch nimmt wie der eigentliche Versuch. Zum anderen ist es für den Bewerter bzw. Rater ebenfalls schwer möglich sich über diesen Zeitraum hinweg vollständig zu konzentrieren, um die Vielzahl an Müdigkeitsanzeichen zu registrieren und zu notieren. Daraus ergibt sich, dass im Vergleich zur Versuchslänge fast mit einer Verdopplung der Bewertungsdauer zu kalkulieren ist (vgl. Muhrer und Vollrath, 2010a & 2010b).

Ein Verfahren, welches nach einem sehr ähnlichen Muster vorgeht wie die zeitkontinuierliche Erfassung ist die quasikontinuierliche Bewertung. Hierbei wird wiederum die gesamte Versuchsdauer bewertet, jedoch mit dem Unterschied, dass die Gesamtlänge in bestimmte Zeitabschnitte unterteilt wird, welche dann separat bewertet werden. Meist haben diese Zeitintervalle eine Dauer von fünf bzw. zehn Minuten. Diese Intervalle werden dann nach dem zeitkontinuierlichen Bewertungsverfahren (d.h. vollständig) geratet. Vorteil dieses Vorgehen ist es, dass man nach einer bestimmten Anzahl an Intervallen Pausen für die Bewerter einplanen kann. Trotz dieses Vorteils bleibt der zeitliche Aufwand ebenso hoch wie jener beim zeitkontinuierlichen Verfahren.

Aufgrund dieser Nachteile wird meist ein Verfahren eingesetzt, welches als „Time-Sampling-Methode“ (American Psychological Association, 1928; Olson & Cunningham, 1934) bekannt ist. Hierbei wird im Gegensatz zur zeit- und quasikontinuierlichen Beobachtung nur ein bestimmter Zeitraum betrachtet. Meist werden dafür die vorhandenen Videoaufnahmen in fünf- bis zehnminütige Abschnitte unterteilt, von denen dann jeweils ein bis zwei Minuten hinsichtlich definierter Müdigkeitsmerkmale bewertet werden. Durch dieses Vorgehen verringert sich der zeitliche Aufwand enorm (Vergleich Aufnahme von 60 Minuten: Zeitkontinuierliche Bewertung mind. 60 Minuten, Time-Sampling-Methode bei 10-minütigen Abschnitten und Beobachtungsintervall von 2 Minuten = 12 Minuten). Durch die diskontinuierliche Beobachtung besteht allerdings die Gefahr, wichtige Anzeichen von Müdigkeit zu übersehen (Muhrer und Vollrath, 2010b). Ein Vergleich des quasikontinuierlichen und Time-Sampling-

Verfahrens wurde von Muhrer und Vollrath (2010b) durchgeführt und zeigte zwischen den beiden Bewertungsverfahren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich einer Müdigkeitsbewertung auf.

Wie sich zeigt, sind unterschiedliche Ansätze vorhanden, um die Müdigkeitsreferenzierung durch Experten durchzuführen. Anhand dieser Verfahren ist jedoch noch nicht definiert, welche Anzeichen für welchen Müdigkeitsgrad als Referenz dienen. Erst die Definition dieser Anzeichen ermöglicht, unabhängig vom Betrachtungszeitraum, eine Müdigkeitsreferenzierung durch einen Experten. Diese Fremdbeurteilung bzw. Fremdbeobachtung der Müdigkeitsanzeichen werden nachfolgend dargestellt.

Exkurs Ende

Je nach zeitlichen sowie finanziellen Aspekten kommt eine der beschriebenen zeitlichen Bewertungsverfahren zum Einsatz (Kapitel 0). Von den Fremdbewertungsskalen gibt es eine ähnliche Vielzahl an Bewertungsverfahren wie sie auch für die Selbstbewertung vorhanden sind. Eine der am häufigsten verwendeten stellt die Fremdbewertungsskala nach Wierwille und Ellsworth (1994) (Abbildung 15) dar.

| | | | | | | | | | |
|-------------------|--|---------------|--|---------------|--|--------------|--|----------------|--|
| Abschnitt # _____ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Nicht müde | | etwas müde | | mäßig müde | | sehr müde | | extrem müde | |

Abbildung 15: Fremdbewertungsskala (zit. nach Wierwille und Ellsworth, 1994, S. 573).

Da diese Skala als „Grundlage“ für die bereits angesprochene neuentwickelte Braunschweiger Müdigkeitsskala (SOMS) diene, soll hier die Entwicklung der Fremdbewertungsskala nach Wierwille und Ellsworth (1994) kurz beschrieben werden.

In ihrer Untersuchung zur Entwicklung dieser Skala haben Wierwille und Ellsworth (1994) sechs Ratern insgesamt 48 Videosequenzen von Fahrern (je 24 pro Sitzung) vorgespielt. Zur Überprüfung der Intraraterreliabilität wurden drei Sequenzen je Sitzung doppelt vorgegeben. Die Test-Retest-Reliabilität wurde durch die zwei Sitzungen realisiert, welche im Abstand von einer Woche stattfanden. Aufgabe der Bewerter war es, jeden Fahrer auf Grundlage von definierten Merkmalen der Müdigkeit (z.B. für „not drowsy“ normalen Gesichtstonus, normale Lidschlussgeschwindigkeit, usw.; für „extremely drowsy“ Einschlafereignisse, überlange Lidschlusszeiten, usw.) auf der Skala (Abbildung 15) einzuordnen. Dies wurde durch einen senkrechten Strich auf der Skala realisiert. Bezüglich der Intraraterreliabilität zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen den doppelt vorgegebenen Sequenzen ($r = .88$). Die Interraterreliabilität zeigt ebenfalls ein sehr hohes signifikantes Maß an Zusammenhang für beide Sitzungen auf ($r = .81$). Lässt man die geringe Anzahl an Ratern unberücksichtigt, so lässt sich postulieren, dass Wierwille und Ellsworth (1994, S. 573) ein durchaus reliables Messinstrument entwickelt haben.

Neben diesem Bewertungsverfahren finden sich in der Literatur noch weitere Skalen für die Fremdbewertung der Müdigkeit wie z.B. die

- (1) HFC Müdigkeitsskala 2.0 (Human Factors Consult, 2011)
- (2) TUBS Müdigkeitsskala der Technische Universität Berlin (Kolrep, Rimini-Döring, Oehme, Jürgensohn, & Altmüller, 2005)
- (3) Subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS) (5x3 stufig) (Reinprecht et al., 2011b) (Neuentwicklung, siehe Kapitel 3.1)

(1) Die HFC Müdigkeitsskala beurteilt die Müdigkeit von Personen anhand von neun Unterskalen, welche sich aus dem Blick- und Lidschlussverhalten, Mimik, Handlung, etc. ergeben. Die nuanciert abgestuften Beobachtungskriterien liefern die Urteilsbasis für die Gesamtbewertung (Human Factors Consult, 2011). Da die erste Version dieser Skala einige Schwächen aufzeigte wurde die Skala nochmals überarbeitet und in folgenden Punkten verbessert bzw. erweitert:

- Zustände geringer Müdigkeit bzw. hoher Aktiviertheit werden besser und zuverlässiger differenziert,
- die Beschreibung durch 9 Verhaltensindikatoren gelingt differenzierter und genauer,
- ein neues Erfassungskonzept auf der Basis eines MS-Excel-Templates erleichtert und beschleunigt die Beurteilung,
- der Beurteilungsprozess ist neu beschrieben und verbessert worden.

Genauere Angaben über die Entwicklung dieser Skala sind jedoch nicht vorhanden.

(2) Ein weiteres Verfahren ist die Müdigkeitsskala der TU Berlin. Diese beurteilt neun Einzelindikatoren von Müdigkeit, die zu einem Gesamturteil auf einer 7-stufigen Müdigkeitsskala zusammengefasst werden. Die Autoren postulieren für die Müdigkeitsbewertung Cronbachs' α Werte von .90 über drei unterschiedliche Beurteiler hinweg. Zudem ist es laut den Autoren mit dieser Skala auch möglich „unterschiedliche Beanspruchungsniveaus“ (Kolrep et al., 2005, p. 68) abzubilden.

(3) Durch die SOMS ist es nicht nur möglich, die subjektive Müdigkeit zu referenzieren, sondern es ist mit dieser Neuentwicklung auch möglich eine objektive bzw. beobachtbare Müdigkeitsreferenzierung durchzuführen. Hierbei bietet das Verfahren den Vorteil, dass sowohl subjektiv als auch objektiv die gleichen Wertebereiche zur Müdigkeitsreferenzierung vorliegen. Die genaue Darstellung ist aus Kapitel 3.1 zu entnehmen.

Wie sich für die Fremdbewertungsskalen zeigt, werden für die Müdigkeitsreferenzierung grundsätzlich bestimmte Anzeichen (z.B. langer Lidschluss, Gähnen, Reiben der Augen, usw.) vorab definiert. Tritt eines dieser Anzeichen während der Beobachtungseinheit ein, so wird dies durch den Beobachter bzw. Rater bewertet. Diese Bewertung mündet letzten Endes in einem bestimmten Score für Müdigkeit. Einige Verfahren sind sogar in der Lage nicht nur bestimmte Müdigkeitsstufen bzw. Stadien zu erkennen sondern auch unterschiedliche Beanspruchungsniveaus (Kolrep et al.,

2005). Durch die guten Ergebnisse, die über verschiedene Bewerter hinweg berichtet werden, ist die videobasierte Müdigkeitsbewertung im Moment die „... effektivste und effizienteste Methode zur Erfassung von objektiver Müdigkeit...“ (Karrer-Gauß, 2012, p. 15). Allerdings stellen sich auch für die Fremdbewertungsskalen bestimmte Nachteile.

Der größte Nachteil ist, dass sich Müdigkeit bei jeder Person anders zeigen kann. Als Extrembeispiel dienen Vielfahrer, die oft ein Phänomen zeigen, welches mit „Schlafen mit offenen Augen“ beschrieben werden kann (Miles, 1926) und gleichgesetzt bzw. verknüpft werden kann mit dem Zustand des „Driving without awareness (DWA)“ (Kerr, 1991; Miles, 1926). Diese Fahrer zeigen zwar Merkmale, welche über die Skalen erfasst werden (z.B. Starren der Augen), jedoch sind diese Personen in der Realität schon weit über dem Stadium einer mittleren Müdigkeit (vgl. Kapitel 3.1) hinaus. Zusätzlich zu der großen Varianz an möglichen Müdigkeitsanzeichen von Personen ergibt sich ein weiterer Nachteil. Dieser liegt darin, dass manche Merkmale in bestimmten Müdigkeitsstadien von Personen gar nicht gezeigt werden (Wierwille & Ellsworth, 1994) (z.B. Schlafen mit offenen Augen). Zudem ergibt sich, je nach verwendetem zeitlichem Bewertungsverfahren die Gefahr (vgl. Kapitel 0), ein relevantes Ereignis (z.B. Einschlafereignis) zu verpassen. Zusätzlich wird in der Literatur immer wieder von „geschulten“ bzw. „erfahrenen“ (vgl. Wierwille & Ellsworth, 1994) Ratern berichtet. Daher ist davon auszugehen, dass auch die Erfahrung bzw. die Einschulung der Rater, wie es sich auch in anderen Gebieten der Psychologie zeigt (vgl. Weigle, 1994), einen Einfluss auf die Müdigkeitsbewertung hat.

Insgesamt betrachtet lässt sich festhalten, dass sowohl die subjektiven als auch die beobachtbaren Verfahren relativ gut geeignet sind, um Müdigkeit zu referenzieren, jedoch beide Verfahren Vor- und Nachteile besitzen, welche es zu berücksichtigen gilt. Es kommt hinzu, dass es, bis auf die SOMS, keine publizierten Messverfahren zur Müdigkeitsreferenzierung gibt, welche auf einem gleichen Skalenniveau (vgl. Kapitel 3.1) die subjektive wie auch die objektive Müdigkeit erfassen. Hierin besteht der größte Vorteil der SOMS gegenüber den anderen Messverfahren. Aus diesem Grund werden für die vorliegende empirische Arbeit diese Skalen verwendet.

Mit der Bewertung der Müdigkeitserhebungsverfahren schließt sich der theoretische Teil dieser Arbeit.

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Literatur zum Thema Müdigkeit nochmals kurz dargestellt und die daraus entstehenden Ansatzpunkte für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

2.14 Ableitung der Fragestellungen

Die Motivation für diese Arbeit sind einerseits die Unfallzahlen andererseits neue Erkenntnisse zum Thema Müdigkeit im Straßenverkehr zu erforschen. Die Unfallzahlen wurden im Zusammenhang mit Müdigkeit betrachtet. Hierbei wurde festgestellt, dass in der amtlichen Unfallstatistik Müdigkeitsunfälle so gut wie gar nicht vorkommen. Die Prävalenz liegt bei ca. einem Prozent. In der facheinschlägigen Literatur zeigt sich jedoch, dass Unfälle durch Müdigkeit bedeutend häufiger vorkommen. Die Zahlen reichen hier bis zu 40 Prozent. Aber wieso ist der Müdigkeitsunfall in der amtlichen Unfallstatistik so stark „unterrepräsentiert“?

Mögliche Gründe hierfür könnten zweierlei sein: Zum einen verlaufen Müdigkeitsunfälle meist schwer (vgl. Kapitel 2.1), was zur Folge haben kann, dass es nicht mehr möglich ist den Verunfallten nach dem Unfallgrund zu befragen. Sofern kein Fahrer mehr befragt werden kann, ist eine direkte Zuordnung als Müdigkeitsunfall kaum möglich, da keine objektiven Kennwerte wie z.B. bei Alkohol die Blutalkoholkonzentration, zur Identifikation vorliegen. Für diese werden in der Literatur jedoch einige „Anhaltspunkte“ beschrieben die eine Zuordnung als Müdigkeitsunfall ermöglichen (z.B. Auffahren auf ein Hindernis ohne Abwehrreaktion).

Zum anderen kann es auch daran liegen, dass Fahrer ihre Müdigkeit nicht richtig einschätzen und es dadurch zu einem Unfall kommt. In der Literatur finden sich zahlreiche Quellen (vgl. Kapitel 2.13) darüber, dass Probanden nur bedingt in der Lage sind, ihren Müdigkeitszustand entsprechend zu bewerten. Was für die Statistik daraus folgt ist, dass Fahrer bei der Frage nach dem Unfallhergang auch keine entsprechenden Angaben machen.

Dieses Problem der subjektiven Fehleinschätzung ist auch in der Assistenzentwicklung relevant. Auch hier benötigt man valide Müdigkeitswerte, um die Assistenz entsprechend auszulegen. Dieser Herausforderung könnte man begegnen, wenn nicht die Person selbst ihren Müdigkeitszustand beurteilt, sondern dieser durch eine externe Referenzierung (z.B. durch einen geschulten Rater) erfolgt. Allerdings ergeben sich auch hier Schwierigkeiten. Durch diese Methode besteht die Gefahr, dass wichtige Müdigkeitsanzeichen der beobachteten Person durch den Bewerter übersehen oder nicht richtig zugeordnet werden können. Zudem zeigt sich Müdigkeit im Verhalten sehr individuell. Dies kann dazu führen, dass eine externe Referenzierung die Müdigkeitsmerkmale die von Personen gezeigt werden können nicht erschöpfend beinhaltet und so auch nicht erschöpfend erfasst werden kann.

Eine mögliche Lösung hierfür ist die Entwicklung eines Messinstrumentes, welches sowohl subjektiv als auch objektiv eine Beurteilung der Müdigkeit auf dem gleichen Skalenniveau zulässt. Dies hat den Vorteil, dass man das subjektive Empfinden mit den objektiven Müdigkeitsanzeichen abgleichen und somit validieren kann. Da eine derartige (subjektive und objektive) Müdigkeitsreferenzierung bis dato noch nicht existiert, jedoch die Grundlage für eine adäquate Assistenzsystementwicklung darstellt, wurde zu Beginn der Untersuchungen ein derartiges Verfahren entwickelt.

Erst eine zuverlässige Referenzierung der Müdigkeit der Fahrer erlaubt es, systematisch nach Unterschieden im (Fahr-)Verhalten in Abhängigkeit der Müdigkeit zu suchen.

Wie sich in den Befunden aus der Literatur ableiten lässt, sind die Parameter, die zur Unterscheidung von unterschiedlichen Müdigkeitszuständen herangezogen werden oftmals unterschiedlich (vgl. Kapitel 2.6). Es zeigt sich jedoch auch, dass bestimmte Variablen wie z.B. die Standardabweichung in der Spurführung in vielen Untersuchungen sensitiv auf eine Müdigkeitsveränderung reagieren. Allerdings ist der Versuchsablauf bzw. die verwendete Strecke oft schwer nachzuvollziehen. Dies liegt meist daran, dass genaue Angaben darüber fehlen, wie die Strecke beschaffen ist, unter welchen Lichtbedingungen gefahren wurde, wie sich die Stichprobe zusammensetzt usw. Demzufolge ist ein studienübergreifender Vergleich problematisch. Zudem werden in den meisten Studien nur wache mit extrem müden Fahrern bzw. Fahrern, die ein Einschlafereignis zeigten, verglichen. Will man aber ein Assistenzsystem für Müdigkeit entwickeln, welches den Fahrer nicht erst dann warnt, wenn er schon eingeschlafen ist, ist es notwendig, Müdigkeitszustände differenzierter zu betrachten. Dadurch lassen sich Aussagen darüber ableiten, wie sich unterschiedliche Fahrparameter in den jeweiligen Müdigkeitszuständen verhalten bzw. verändern.

Allerdings steht man hier vor einem weiteren Problem. Da es ethisch nicht vertretbar ist, Fahrer in der Realität bis zum Einschlafen fahren zu lassen, bedient man sich der Hilfe von Fahrsimulatoren. Hier hat man die Möglichkeit, den Fahrer ohne jegliche Gefährdung für sich und andere in sehr hohen Müdigkeitszuständen fahren zu lassen. Was man allerdings bedenken muss, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein reales Fahrverhalten. Einige wenige Untersuchungen haben sich zum Ziel gesetzt, den Müdigkeitseinfluss in unterschiedlichen Verkehrsumwelten (Realität und Simulation) zu analysieren. Die Ergebnisse die in diesen Studien berichtet werden, stützen die Annahme, dass das Verhalten unterschiedlich sein kann. Demzufolge ist es notwendig, Müdigkeitsauswirkungen auf das Fahrverhalten in beiden Verkehrsumwelten zu betrachten.

Auf Grundlage dieser Daten können Grenzwerte abgeleitet werden, innerhalb dieser unterschiedlich wache bzw. müde Fahrer einzuordnen sind.

Anzumerken ist jedoch, dass eine reine Suche nach Unterschieden im Fahrverhalten noch keine Aussage darüber zulässt, ob es dadurch auch möglich ist, Müdigkeit zu detektieren. Die beschriebenen Grenzwerte können einen ersten Anhaltspunkt darüber liefern, ob jemand aktuell als müde einzustufen ist oder nicht.

Allerdings, so zeigt es sich auch in der Literatur, wäre eine Müdigkeitsdetektion auf Einzelparameterebene zwar möglich, allerdings auf Grund der großen Variation bzw. Auswirkungen von Müdigkeit wohl nicht zielführend. Demzufolge müsste eine Kombination aus unterschiedlichen Parametern zur Müdigkeitsdetektion verwendet werden. Erst diese Kombination stellt ein sinnvolles Vorgehen für die Entwicklung eines Assistenzsystems dar. Es zeigen sich jedoch nur selten Befunde darüber, wie gut eine derartige Müdigkeitsdetektion tatsächlich erfolgen kann. Die meisten dieser Studien wurden von Ingenieuren durchgeführt welche sehr häufig Machine-Learning-Verfahren (z.B. Support-Vektor-Machine, Bayessche Netze, usw.) verwenden. Der Nachteil dabei ist, dass es dadurch nicht bzw. nur schwer möglich ist, genau zu hinterfragen was von den einzelnen Verfahren als Müdigkeitsindikatoren herangezogen wird. Trotz dieses Nachteils werden derartige Verfahren sehr häufig für Müdigkeitsdetektionsaufgaben eingesetzt und erzielen hierbei auch durchaus gute Ergebnisse (vgl. Kapitel 2.7). Diese reichen teilweise bis hin zu 100 Prozent. Wenn es demnach

bereits Verfahren mit derart guten Ergebnissen gibt, wieso sollte man noch weiter forschen?

Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe. Einer dieser Gründe ist, dass die Studien, die so gute Ergebnisse liefern, meist mit Extremfällen von Müdigkeit arbeiten. Die Klassifikation erfolgt demnach nur dann so gut, wenn das Verfahren zwischen einer wachen und „schlafenden“ Person unterscheiden soll. Demzufolge ist hier auch die Möglichkeit einer Detektion erst in einem sehr späten Müdigkeitsstadium gegeben. Dieses Vorgehen wird in fast allen Studien verwendet. Ein Grund hierfür könnte sein, dass sich die Anzeichen von sehr hoher Müdigkeit über viele Personen hinweg relativ gleich darstellen und damit gut erkannt werden können.

Besonders in Bezug auf die Detektion von Müdigkeit im Straßenverkehr wäre jedoch eine frühere Müdigkeitsdetektion sinnvoll, um dem Fahrer Zeit zu geben, auf eine Müdigkeitswarnung auch entsprechend reagieren zu können. Müdigkeit frühzeitig zu detektieren funktioniert bis dato allerdings sehr unzuverlässig.

Die Schwierigkeiten für eine frühere Müdigkeitsdetektion könnten in den stark individuell unterschiedlichen Auswirkungen von Müdigkeit begründet sein. Um diesen zu begegnen werden sogenannte Baselines eingeführt. Hierbei wird für jede Person ein individueller Ausgangswert gebildet und mit nachfolgenden Werten verglichen. Dies scheint im ersten Ansatz auch recht sinnvoll. Bei näherer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass auch dieser Weg mit Steinen gepflastert ist. Systeme, die mit einer Baseline arbeiten, gehen grundsätzlich davon aus, dass der Fahrer bei Fahrtbeginn wach ist. In dieser Annahme liegt auch das Problem der Methode. Steigt beispielsweise ein Schichtarbeiter nach einer Nachtschicht in sein Fahrzeug, ist die Grundannahme eines wachen Fahrers kaum haltbar. Das heißt, wenn man mit einer Baseline arbeitet, müsste man sicherstellen, dass die Baseline auch in einem wirklich wachen Zustand des Fahrers erhoben wird. Erst dadurch ist es möglich, eine Aussage über die Sinnhaftigkeit einer Baseline zu gewinnen. Dieser Nachweis fehlt jedoch ebenfalls.

Abgesehen von den gerade beschriebenen Aspekten, die bei der Prüfung von Unterschieden und der Detektion von Müdigkeit zu beachten sind, wird in einem Exkurs dieser Arbeit auf einen weiteren Punkt eingegangen.

Die meisten Studien hinsichtlich Müdigkeit im Straßenverkehr werden auf Autobahnen durchgeführt. Sieht man sich allerdings die Unfallzahlen näher an so zeigt sich, dass ein Großteil der Müdigkeitsunfälle auf Landstraßen (vgl. Kapitel 2.1) und nicht, wie man es erwarten würde, auf Autobahnen geschieht. Ein Grund für die geringe Anzahl an Studien auf der Landstraße könnte sein, dass die Datenerfassung mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Dies ist beispielsweise durch die mangelhafte Güte der Spurmarkierung bedingt. Um dem zu begegnen müsste man entweder die Qualität der Datenerfassung erhöhen oder nur ausgesuchte Streckenabschnitte für eine Müdigkeitserkennung heranziehen. Erst mit den entsprechenden Daten könnten man Unterschiede im Fahrverhalten in Abhängigkeit von Müdigkeit auf einer Landstraße analysieren. Dies wurde bis dato noch nicht systematisch untersucht.

Nach diesem Exkurs wird die Betrachtung des Verhaltensspektrums der Fahrer unter Müdigkeitseinfluss um einige Parameter erweitert.

Der Grund dafür ist, dass zusätzlich zu den Fahrparametern in vielen Studien zur Müdigkeit auch weitere Verhaltensparameter analysiert werden. Dies können z.B. Augen- Blick- bzw. Lidbewegungen oder Sprachdaten sein. Dies scheint soweit auch recht gut zu funktionieren (vgl. Kapitel 2.9). Auch hier werden teilweise Detektionsraten von bis zu 100 Prozent berichtet.

Wenn man die Studien näher betrachtet, so zeigt sich ein ähnliches Phänomen wie in den Studien zum Fahrverhalten. Meist werden erst sehr späte Stadien von Müdigkeit zuverlässig unterschieden bzw. erkannt. Demzufolge fehlt auch hier der Nachweis darüber, wie gut Unterschiede in früheren Müdigkeitszuständen zu detektieren sind.

Wie sich aus dieser Zusammenfassung ableiten lässt, sind bestimmte Schritte dafür notwendig, dass ein zuverlässiges und valides Assistenzsystem entwickelt werden kann, welches den Fahrer rechtzeitig warnt.

Grundlage für sämtliche Untersuchungen ist die valide Referenzierung von Müdigkeit. Erst dadurch ist es möglich, eine systematische Betrachtung der Auswirkungen von unterschiedlichen Müdigkeitszuständen durchzuführen. Aus diesen Unterschieden lassen sich Grenzwerte ableiten, die ein spezifisches Fahrverhalten unter einem definierten Müdigkeitszustand darstellen. Erst dann kann man den nächsten Schritt wagen und eine Müdigkeitsdetektion durchführen. Hier könnte man zur Verbesserung der Erkennung entweder eine Baseline einführen und/oder weitere Verhaltensdaten aufnehmen.

Aus dieser Zusammenfassung ergeben sich nun folgende Herausforderungen bzw. Fragestellungen die in dieser Arbeit beantwortet werden:

- 1. Müdigkeitsreferenzierung
 - Entwicklung eines subjektiven und objektiven Müdigkeitsreferenzierungssystems
- 2. Müdigkeitsauswirkungen
 - Wie wirken sich verschiedene Müdigkeitszustände auf das Fahrverhalten aus und sind diese Müdigkeitsauswirkungen personenabhängig?
- 3. Übertragbarkeit
 - Lassen sich die Ergebnisse der Fahrdaten aus der Simulation auf eine reale Fahrumgebung übertragen?
- 4. Festlegung von Grenzwerten
 - Innerhalb welcher Grenzwerte der Fahrdaten bewegt sich ein wacher bzw. müder Fahrer?
- 5. Müdigkeitsdetektion
 - Welche Parameter sind mit welcher Güte geeignet unterschiedliche Müdigkeitszustände zu erkennen?
- 6. Individuelle Parametrierung
 - Ist eine Baseline notwendig um Müdigkeit sicher zu erkennen?
- 7. Exkurs: Müdigkeitsauswirkungen auf Landstraßen
 - Welche Fahrparameter unterscheiden sich auf einer Landstraße in Abhängigkeit des Müdigkeitszustandes?
- 8. Verwendung weiterer Verhaltensdaten zur Müdigkeitsdetektion
 - Können zusätzlich zu den Fahrdaten, Sprach- Blick- und Pupillenparameter einen positiven Beitrag zu einer Müdigkeitserkennung leisten?

Wie sich aus den Herausforderungen und Fragestellungen ergibt, ist es nicht möglich, diese mit nur einer Studie zu beantworten. Aus diesem Grund wurden in vorliegender Arbeit insgesamt vier Studien durchgeführt. Hierbei hatte jede Studie einen bestimmten Fokus, um möglichst viele Aspekte der Thematik abzudecken.

Die erste Studie, eine Simulatorstudie, hatte zum Ziel, grundsätzliches über Müdigkeit in einer kontrollierten Verkehrsumgebung zu erfahren. Diese Studie diente dazu, das Fahrverhalten von Fahrern unter Müdigkeit auf einer Autobahn und einer Landstraße zu untersuchen. Grund für die Einführung zweier unterschiedlicher Straßentypen war, dass nahezu keine Studien über das Verhalten von Fahrern auf Landstraßen im Kontext von Müdigkeit vorliegen.

Die zweite Studie, eine Realfahrtstudie, hatte zum Ziel, die gefundenen Ergebnisse aus dem Simulator mit der Realität zu vergleichen um dadurch Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu identifizieren. Zudem sind bis dato keine Studien vorhanden, die Müdigkeit auf einer realen Landstraße untersuchen.

In den ersten beiden Studien zeigte sich, dass aufgrund der beiden verwendeten Straßentypen und der daraus folgenden Aktivität der Fahrer die Müdigkeitsausprägungen eher gering blieben. Aus diesem Grund wurde in der dritten Studie, ebenfalls

einer Realfahrtstudie, nur noch der Straßentyp Autobahn für die Messfahrt verwendet. Ziel war es, höhere Müdigkeitszustände bei den Fahrern zu induzieren und dadurch die Datengrundlage für die Auswertung zu erhöhen.

In der vierten Studie, einer Simulatorstudie, wurde ebenfalls nur auf der Autobahn gefahren. Hierdurch sollten sich wieder höhere Müdigkeitsausprägungen bei den Teilnehmern ergeben und somit die Datengrundlage weiter verbessert werden. Zusätzlich wurden zu den Fahrdaten noch weitere Daten (Blick- und Sprachdaten) erhoben. Ziel war hier, durch die Aufnahme von zusätzlichen Daten grundlegende Unterschiede in diesen Verhaltensdaten zu identifizieren sowie die Müdigkeitsdetektion zu verbessern.

Da in den vier Studien einige Komponenten wie z.B. der Fahrsimulator oder das Messfahrzeug mehrmals verwendet wurden, werden im anschließenden empirischen Teil, nach der Darstellung des entwickelten Müdigkeitsreferenzierungsverfahrens, zuerst die Methoden der vier Studien dargestellt. Erst im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Studien berichtet.

3. EMPIRISCHER TEIL

3.1 Methodenentwicklung

3.1.1 Entwicklung des Referenzierungssystems zur Müdigkeitserfassung: Subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS)

Das hier entwickelte Müdigkeitsreferenzierungssystem besteht aus einer subjektiven sowie einer objektiven Müdigkeitsskala. Der große Vorteil dieses Referenzierungssystems liegt darin, dass beide Skalen ein gleiches Skalenniveau aufweisen. Zudem sind für die objektive Beurteilung der Müdigkeit definierte Verhaltensmerkmale hinterlegt, die aus der Literatur abgeleitet wurden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Bewertung der Müdigkeit zweistufig ist und somit eine sehr differenzierte Müdigkeitsreferenzierung möglich ist.

Nachfolgend wird zuerst das subjektive, danach das objektive Referenzierungssystem vorgestellt.

3.1.1.1 Subjektives Müdigkeitsreferenzierungssystem

Das subjektive Müdigkeitsreferenzierungssystem stellt das in Kapitel 2.13 besprochene vierte Selbstbewertungsverfahren dar.

Der Aufbau des Systems bietet einige Vorteile und stellt sich wie folgt dar: Grundsätzlich gliedert es sich in ein 2-stufiges Antwortformat (Grobskala und Feingliederung) (Abbildung 16). Durch diese Aufgliederung ergibt sich der Vorteil, dass zum einen keine Zahlen als Anker verwendet werden, die eine hohe Müdigkeitsnennung unterbinden könnte. Zum anderen gelingt es durch die 2-stufige Aufgliederung Müdigkeit in insgesamt 13 Stufen sehr differenziert zu erfassen. Zusätzlich ist die Erklärung der Skala einfach und es bedarf keines Erlernens der Skala durch die Probanden.

Die Abfrage nach dem aktuellen Müdigkeitsstatus der Probanden erfolgt in Zeitintervallen von 10 Minuten. Dieses Intervall wurde aus Befunden in der Literatur abgeleitet. Die Aufgabe der Person ist es, nach der Frage „Wie müde fühlen Sie sich aktuell?“ zuerst eine Antwort auf der Grobskala „wach“, „wenig“, „mittel“, „stark“ und „sehr stark“ zu geben und dann im zweiten Schritt noch eine Feingliederung in der entsprechenden Müdigkeitsstufe („-“, „0“, „+“) vorzunehmen. Auf eine Feingliederung im Zustand „wach“ wurde verzichtet, da dies nach Ansicht der Autoren für eine Müdigkeitsskala nicht zweckmäßig erscheint. Durch die Aufteilung in ein zweistufiges Antwortformat kann eine sehr genaue Unterscheidung auch innerhalb der einzelnen groben Müdigkeitsstadien erfolgen.

| wach | wenig | | | mittel | | | stark | | | sehr stark | | |
|------|-------|-----|-----|--------|-----|-----|-------|-----|------|------------|------|------|
| 0 | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | + |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |

Abbildung 16: Müdigkeitsskala zur Erfassung der subjektiven Müdigkeit (in Klammer Skalenwert der Müdigkeit) (Muhrrer & Vollrath, 2010a in Reinprecht et al., 2011b, S. 142).

Für weitere Berechnungen werden die subjektiven Müdigkeitsäußerungen der Probanden in Zahlenwerte transformiert. Diese werden bei der Vorgabe der Skala an den Probanden nicht dargestellt und sind in Abbildung 16 ersichtlich. Dem Müdigkeitszustand „wach 0“ wird der numerische Wert 1 zugeordnet, „wenig –“, der numerische Wert 2, usw. ... dem Müdigkeitszustand „sehr stark +“ der Zahlenwert 13.

Für die Erhebung der jeweiligen Müdigkeitsstufe sind bis zu 15 Sekunden einzuplanen. Für diese Zeit wird die Skala zur Beantwortung der Frage vorgegeben.

Wie im ersten Teil dieser Arbeit beschrieben wurde, ist eine rein subjektive Müdigkeitsreferenzierung durchaus problematisch. Aus diesem Grund wurde auf einem gleichen Skalenniveau ein objektives Referenzierungssystem entwickelt. Beide Teile ergeben die SOMS.

3.1.1.2 Objektives Müdigkeitsreferenzierungssystem

Für die Entwicklung der Fremdbewertungsskala der Müdigkeit waren zwei Punkte von besonderer Relevanz.

- (1) Es sollten von außen gut beobachtbare Merkmale der Müdigkeit in die Skala integriert werden.
- (2) Es sollte eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit der entwickelnden Selbstbewertungsskala gegeben sein.

Um den ersten Punkt zu erfüllen, wurde die Skala in Anlehnung an die Fremdbewertungsskala von Wierwille, Ellsworth, Wreggit, Fairbanks und Krin (1994) aufgebaut, die ebenfalls fünf Kategorien zur Unterteilung der Müdigkeit enthält („Not Drowsy“, „Slightly Drowsy“, „Moderately Drowsy“, „Very Drowsy“ & „Extremely Drowsy“) (Wierwille & Ellsworth, 1994, S. 573). Auf dieser Grundlage wurden in abgewandelter Form die Oberkategorien der eigenen Fremdbewertungsskala erstellt. Diesen Kategorien sind objektive Parameter zugeordnet, um ein eindeutiges Zuteilen (Abbildung 17) der Versuchspersonen in die einzelnen Müdigkeitsstadien durch die Rater zu gewährleisten (Muhrrer & Vollrath, 2010a in Reinprecht et al., 2011b).

| Kategorie | Ereignis findet statt (Strichliste) | Bewertung |
|--|--|------------------------------|
| | | |
| Wach | | Wach |
| | | 0 (1) |
| Leichte Müdigkeit | | Leichte Müdigkeit |
| Verlangsamter Lidschluss, auffälliges Blinzelnverhalten | | - (2) |
| Müder Gesichtsausdruck | | 0 (3) |
| Augen ruhig | | + |
| Gähnen, tiefes Einatmen | | (4) |
| Reiben, kratzen | | |
| Kopf schieflegen, ablegen, abstützen | | |
| Sitzposition verändern | | |
| | | |
| | | |
| Mittlere Müdigkeit | | Mittlere Müdigkeit |
| Lange Lidschlüsse | | - (5) |
| Augen starren > 4 s (Fokus verlieren) | | 0 (6) |
| Strecken, Räkeln | | + |
| | | (7) |
| | | |
| | | |
| Starke Müdigkeit | | Starke Müdigkeit |
| Lidschluss > 2 s | | - (8) |
| Augen rollen | | 0 (9) |
| Kopf nicken | | + |
| | | (10) |
| | | |
| | | |
| Sehr starke Müdigkeit | | Sehr starke Müdigkeit |
| Lidschluss > 4 s | | - (11) |
| Einschlafen | | 0 (12) |
| Körperzucken, Schreck- sekunde | | + |
| | | (13) |
| | | |
| | | |

Abbildung 17: Müdigkeitsskala zur Erfassung der objektiven Müdigkeit (in Klammer Skalenwert der Müdigkeit) (Muhrrer & Vollrath, 2010a in Reinprecht et al., 2011b, S. 142).

Diese Merkmale entstanden zum einen nach einer intensiven Durchsicht der Müdigkeitsliteratur sowie durch Diskussionen über qualitativ unterschiedliche Müdigkeitszustände. Die so extrahierten Merkmale (z.B. langer Lidschluss) stellen bestimmte Zustände von Müdigkeit dar. Als „wach“ werden Personen klassifiziert, welche z.B. eine hohe visuelle Suche aufweisen und deren Bewegungen aktiv und

schnell erfolgen. Verhaltensweisen wie z.B. Lidschlüsse länger als 4 Sekunden werden in die Kategorie „sehr starke Müdigkeit“ eingeteilt, da es sich hier um Verhaltensweisen handelt, die schon den Übergang zum Einschlafen darstellen und somit einen hohen Müdigkeitsgrad widerspiegeln.

Zusätzlich zu diesen objektiven Merkmalen für die Einteilung der Müdigkeit in die fünf Oberkategorien wurden analog zur Selbstbewertungsskala vier der Oberkategorien (Leichte Müdigkeit, mittlere Müdigkeit, starke Müdigkeit und sehr starke Müdigkeit) (Abbildung 17) in drei Unterkategorien (-, 0, +) unterteilt. Diese dienen einer feineren Abstufung der vorliegenden Müdigkeit. Somit ergeben sich bezüglich der Fremdbewertungsskala die gleichen Kategorien wie in der Selbstbewertungsskala.

Die Referenzierung der Müdigkeit erfolgt folgendermaßen: Die Rater bewerten ein während des Versuchs aufgezeichnetes Video einer Versuchsperson. In dieser Untersuchung wurde das Time-Sampling-Verfahren verwendet, bei dem von einem jeweils 10-minütigem Abschnitt die letzten beiden Minuten (Minute 9 und 10) von zwei unabhängigen Ratern bewertet wurden.

Aufgabe der Rater ist es, von außen sichtbare Anzeichen von Müdigkeit der Versuchsperson, wie sie in der Skala (Abbildung 17) beschrieben sind, zu notieren. Die Auftretenshäufigkeit eines Ereignisses wird für jede Sequenz durch eine Strichliste protokolliert (Ereignis findet statt). Je nach Anzahl der vorhandenen Ereignisse ergibt sich dann die dementsprechende Bewertung auf der übergeordneten Skala „wach“, „wenig“, „mittel“, „stark“ oder „sehr stark“. Unabhängig von der Auftretenshäufigkeit eines Müdigkeitsereignisses wird immer jene Oberkategorie vergeben, die den höchsten Müdigkeitswert nach sich zieht, wobei dies unabhängig davon ist, wie häufig dieses Anzeichen vorgekommen ist.

Beispiel: Zeigt eine Person z.B. sehr häufig lange Lidschlüsse (Kategorie „mittlere Müdigkeit“), schläft aber einmal ein (Kategorie „sehr starke Müdigkeit“) so wird als Endbewertung immer jenes Ereignis für die Einteilung herangezogen, welches die höchste Bewertung nach sich zieht (im Beispiel: „sehr starke Müdigkeit“).

Untersuchungen bezüglich einer Intraraterreliabilität wurde noch nicht durchgeführt. Für die Interraterreliabilität zeigten sich Werte von durchschnittlich $r = .85$ bis $r = .90$ über 25 Versuchspersonen hinweg (Muhrer, Reinprecht & Vollrath, 2010). Zwar fehlen Untersuchungen, welche die zeitliche Stabilität der Müdigkeitsbewertung der Rater belegen, die hohen Konkordanzen zeigen jedoch, dass die Zuteilung der gezeigten Müdigkeitsanzeichen zu den einzelnen Stufen der Skala stabil über zwei Rater hinweg durchgeführt werden kann.

Ein Vergleich bzw. die Korrelation des subjektiven und objektiven Müdigkeitsreferenzierungssystems wird in Kapitel 4.2 dargestellt und entfällt aus diesem Grund an dieser Stelle.

Da sich die Studien methodisch sehr ähnlich waren, werden die Methoden aller vier Studien zur besseren Übersicht nachfolgend gemeinsam beschrieben.

3.2 Methodik der vier Studien

Der Methoden- und Ergebnisteil hat einen speziellen Aufbau, der zum besseren Verständnis kurz erläutert werden soll: Abweichend vom üblichen Aufbau (Methode,

Ergebnisse, Diskussion) werden hier die Methoden aller vier Studien hintereinander dargestellt. Der Grund hierfür ist, dass zum Teil gleiche oder ähnliche Materialien bzw. Streckenabschnitte in den vier Studien verwendet wurden.

Nach der Darstellung der Methoden der Studien erfolgt zuerst eine Datenanalyse, in der Daten aus allen vier Studien eingingen. Dieses Vorgehen wurde aus folgendem Grund gewählt: Da Müdigkeit immer einen bestimmten Verlauf aufweist, wurde es als sinnvoll erachtet die vorliegenden Daten über bestimmte Müdigkeitsstufen hinweg zu betrachten. Damit Daten von wachen bis hin zu sehr müden Fahrern beinhaltet sind, wurden aus allen vier Studien jene Personen zu einer Stichprobe zusammengefasst, die jeweils einen wachen (grünen), einen müden (gelben) sowie einen sehr müden (roten) Müdigkeitswert aufwiesen. Dies war in den einzelnen Studien nur bedingt möglich, da hier die Fallzahlen zu gering waren. Um eine Verlaufsmessung zu realisieren, wurden die Müdigkeitswerte einer Person der jeweiligen Müdigkeitsstufe zugeteilt.

Hierbei wurden Müdigkeitswerte von

| | |
|---|---------------------------------------|
| „wach 0, (1)“ bis „wenig +, (4)“ | der grünen Müdigkeitsstufe, |
| „mittel -, (5)“ bis „mittel +, (7)“ | der gelben Müdigkeitsstufe und |
| „stark -, (8)“ bis „sehr stark +, (13)“ | der roten Müdigkeitsstufe zugeordnet. |

Lagen für eine Person mehrere Müdigkeitswerte innerhalb einer Müdigkeitsstufe vor, so wurden diese arithmetisch gemittelt. Durch diese Zusammenlegung war es möglich, den Verlauf der Müdigkeit gezielt innerhalb einer Person zu verfolgen und so Einblicke über die Veränderung der Daten in Abhängigkeit der Müdigkeit zu erlangen.

Da durch dieses Vorgehen der individuelle Faktor gleichgehalten wurde, wurden im Anschluss an diese Analyse die gleichen Versuchspersonen nochmals als unabhängiges Versuchsdesign analysiert. Hierbei gingen die zuvor gemittelten Müdigkeitswerte je Müdigkeitsstufe (grün, gelb, rot) wieder als Einzelwerte ein. Durch diese Analyse anhand derselben Versuchspersonen ist es möglich Aussagen darüber zu erhalten, inwiefern die Veränderung der Fahrdaten abhängig bzw. unabhängig von Personen ist.

Da durch diese beiden Analysen nur Unterschiede im Fahrverhalten zwischen den Müdigkeitsstufen eruiert werden konnten, jedoch keine Aussagen darüber möglich sind, wie gut mit den Fahrdaten eine Müdigkeitsdetektion erfolgen kann, wurden die Analysen dafür im Anschluss durchgeführt. Anschließend an diese erste Detektionsberechnung wurde nochmals eine Berechnung zur Müdigkeitsdetektion durchgeführt, dieses Mal unter Verwendung einer Baseline.

Im Anschluss daran erfolgt ein Exkurs, indem die Müdigkeitsauswirkungen auf das Fahrverhalten auf einer realen und simulierten Landstraße dargestellt werden.

Die letzte Berechnung diente dazu anhand der erhobenen Blick- und Sprachdaten Unterschiede zwischen den Müdigkeitsstufen aufzuzeigen und eine Verbesserung der Müdigkeitsdetektion zu erlangen und aufzuzeigen.

Zu erwähnen ist hier noch, dass sämtliche Berechnungen (abgesehen von den Analysen im Exkurs Landstraße) nur mit Daten durchgeführt wurden, die auf Autobahnen (sowohl Real- als auch Simulatorfahrt) erhoben wurden. Der Grund hierfür

war, dass es in der Realfahrtstudie auf der Landstraße zu wenige Daten für die oben angeführten (abhängigen) Berechnungen gab. Zudem wurde für die Einteilung in die jeweilige Müdigkeitsstufe die Fremdreferenzierung verwendet. Ausnahme bildet hier nur Studie 4 (zweite Simulatorstudie), da es dort an finanziellen Mitteln für die Fremdreferenzierung fehlte.

Die Diskussion der Ergebnisse findet am Ende der jeweiligen Kapitel statt. Schlussendlich schließt sich der empirische Teil der Arbeit mit der Beantwortung der Fragestellungen und einer zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse.

3.2.1 Methode Studie 1: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Fahrsimulator (Autobahn und Landstraße)

3.2.1.1 Fahrsimulator

Für die Untersuchung wurde der statische High-Fidelity-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie der Technischen Universität Braunschweig verwendet. Der feststehende Fahrsimulator besteht aus drei Leinwänden (vorne, links, rechts) mit einer gesamten Projektionsfläche von ca. 12 m² welche ein Sichtfeld des Probanden von annähernd 180 Grad (Abbildung 18) ermöglichen.

Die Projektion der Fahrsimulation erfolgt durch 3 Full-HD-Beamer mit einer Auflösung von je 1920 x 1080 Pixel. Die Längs- und Querführung des Fahrzeuges wird mittels Pedalerie (Gas-, Brems- & Kupplungspedal) und einem Force-Feedback-Lenkrad bewerkstelligt. Als Sitz dient ein gewöhnlicher Autositz.

Die Anzeige der Geschwindigkeit sowie der Drehzahlen des Motors erfolgt durch getrennte TFT-Screens im Cockpit. Die Spiegel (Mittelspiegel, rechter und linker Außenspiegel) sind ebenfalls als TFT-Screens ausgelegt. Da es sich um einen feststehenden Simulator handelt sind Bewegungen des Szenariums nur visuell durch das Nicken (z.B. beim Bremsen) oder Wanken (z.B. beim Überfahren eines Bordsteins) der projizierten Fahrsimulation möglich. Motoren und Windgeräusche werden über die vorhandenen Lautsprecher (links und rechts im Fußraum) wiedergegeben.

Der Versuchsleiter kann die Versuchsperson mittels einer Videokamera beobachten und so im Notfall (z.B. bei Übelkeit) eingreifen und die Fahrer aus dem Simulator holen. Des Weiteren ist für die Kommunikation zwischen Versuchsleiter und Proband eine Gegensprechanlage installiert, die auch eine Aufzeichnung der Aussagen der Probanden ermöglicht.

Der Simulator steht in einem separierten Raum der durch eine Tür vom Kontrollraum, in dem sich der Versuchsleiter und die Steuerungseinheiten des Simulators befinden, abgetrennt ist.



Abbildung 18: Fahr Simulator der TU Braunschweig, Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie.

3.2.1.2 Simulationssoftware

Die Realisierung der Fahrstrecke erfolgt durch die Software SILAB 2.5 (Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH, 2009). Die gesamte Simulation wird von einem Operatorrechner aus gesteuert. Für die Simulation werden 10 weitere Rechner benötigt. Diese sind mit dem Operatorrechner über Netzkabel verbunden. Alle Rechner verwenden als Betriebssystem Windows XP. Als Hardware dienen Intel Core 2 Duo Prozessoren (E6400) mit einer Rechenleistung von 2.13 GHz, 4 GB Arbeitsspeicher und NVIDIA GeForce 8800GT Grafikkarten.

Der Aufbau der simulierten Fahrstrecke kann über zwei unterschiedliche Module erfolgen. Für die Erstellung von Städten kommt das Modul „SILABAEDIT“ zum Einsatz. Landstraßen sowie Autobahnen werden über einen Texteditor erstellt. Dabei werden auf Grundlage einer Datenbasis über SILABAEDIT oder einem Texteditor Aspekte des Fahrzeugverhaltens, der Visualisierung der Fahrzeuge, der Verkehrsumgebung (Straßennetz, weitere Verkehrsteilnehmer, Gebäude usw.) sowie der Verkehrskontrolle verbunden. Dieser modulare Ansatz ermöglicht es nahezu jede Situation zu erstellen. So können z.B. unterschiedliche Lichtverhältnisse (Tageslicht bis Dunkelheit) dargestellt, die Wetterbedingungen (Sonnenschein bis Schneefall) frei variiert, Brücken und Tunnel erstellt, Straßenbeläge und Reibungskoeffizienten der Straßenoberfläche verändert werden usw. Des Weiteren verfügt die Simulationssoftware über die Möglichkeit Höhenveränderungen darzustellen. Zusätzlich kann anderen Verkehrsteilnehmern ein beliebiges Verhalten zugewiesen werden (z.B. Geisterfahrer). Dies wird vor allem dann verwendet, wenn es z.B. darum geht kritische Situationen herzustellen (z.B. plötzliches Bremsen des Vorderfahrzeugs, o.ä.). Somit ist auch eine Interaktion des Versuchsteilnehmers mit simulierten Fahrzeugen oder anderen Verkehrsteilnehmern in der Simulation möglich. Auf die Gestaltung des Verkehrsflusses kann ebenso Einfluss genommen werden wie auf die Schaltung von Lichtsignalanlagen oder ähnliches.

Als Fahrzeugmodell für das simulierte Versuchsfahrzeug (Egocar) dient ein Fahrzeug der Mittelklasse (BMW 5er-Reihe), dessen Fahrverhalten auf realen Fahrdaten beruht.

Das Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer, als auch jenes der anderen Verkehrsteilnehmer, wird mit einer Taktfrequenz von 60 Hz aufgezeichnet. Somit ergibt sich

alle 16 Millisekunden eine Messwertreihe der Fahrdaten (Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH, 2009). Es können sämtliche Parameter aufgezeichnet werden, die für den Versuch von Interesse sind. Dies können z.B. sein:

- Geschwindigkeit
- Spurhaltung
- Lenkradbewegungen
- Abstand zum Vorderfahrzeug
- Abstand zu einem beliebigen Objekt (z.B. Fußgänger)
- usw.

Die gesamte Datenaufzeichnung erfolgt auf einen separierten Rechner im Netzwerk. Die Daten können entweder im Format .ASCII, .DAT oder .TXT aufgezeichnet werden.

3.2.1.3 Müdigkeitsreferenzierungssystem

Für die Erfassung der Müdigkeit der Versuchspersonen wurde das neuentwickelte Müdigkeitsreferenzierungssystem (Kapitel 3.1.1), die subjektive und objektive Müdigkeitsskala von Braunschweig (SOMS) verwendet.

3.2.1.3.1 Subjektives Müdigkeitsreferenzierungssystem

Die Skala wurde den Versuchspersonen zu Beginn der Teststrecke sowie im Rhythmus von 10 Minuten vorgegeben. Hierbei wurde zuerst ein Ton eingespielt, gefolgt von der visuellen Darbietung der Skala in der Simulation (Abbildung 19). Aufgabe der Versuchspersonen war es, ihre aktuelle Müdigkeit mit Hilfe der Skala abzugeben. Die Beantwortung der Skala durch die Versuchsperson erfolgte verbal. Je nach vorherrschendem Müdigkeitsstatus der Person wurde zuerst die entsprechende Oberkategorie genannt, und dann als weitere Differenzierung die entsprechende Unterkategorie (vgl. Kapitel 3.1.1.1). Zur weiteren Berechnung wurden die subjektiven Müdigkeitsäußerungen der Versuchspersonen in Zahlenwerte transformiert (Müdigkeitszustand „wach 0“ = 1 ... „sehr stark +“ = 13).

3.2.1.3.2 Objektives Müdigkeitsreferenzierungssystem

Die Fremdbewertung der Müdigkeit wurde im Anschluss an die Untersuchung auf Grundlage des aufgezeichneten Videos der Fahrer durch zwei geschulte Rater durchgeführt. Sie erfolgte im „Time-Sampling-Verfahren“. Hierbei wurde das Video in 10-Minutenabschnitte gesplittet und von diesen Abschnitten wurden für die Müdigkeitsreferenzierung jeweils die letzten beiden Minuten (Minute 9 und 10) betrachtet.

Auch hier wurden die objektive Müdigkeit wieder in Zahlenwerte, entsprechend Kapitel 3.1.1.2, umgewandelt.

Die Umwandlung der beobachteten Müdigkeitszustände in Zahlenwerte vollzieht sich nach dem gleichen Schema wie bei der Selbstbewertung. Auch hier steht der Zustand „wach 0“ für 1, der Zustand „sehr starke Müdigkeit +“ für die Zahl 13.

3.2.2 Sonstiges Versuchsmaterial

Den Versuchspersonen wurden eine Einwilligungserklärung sowie ein soziodemographisches Datenblatt vorgegeben. Eine Einweisung zur Bedienung des Fahrsimulators wurde ebenfalls schriftlich vorgegeben. Des Weiteren wurde ein Fragebogen zur Befindlichkeit (Abteilung für Ingenieur- und Verkehrspsychologie, 2008) und zum Fahrverhalten vorgelegt. Der Fragebogen zum Fahrverhalten stellte dabei die deutsche Fassung des Driver Behaviour Questionnaire (Lajunen, Parker & Summala, 2004) von Hagemeister und Enderlein (2008) dar.

Des Weiteren wurde der Fragebogen zum Thema „Autofahren und Müdigkeit“ von Muhrer und Reinprecht (2010) vorgegeben, welcher Aspekte erfasst, die sich mit Assistenzsystemen und Müdigkeit beim Autofahren beschäftigt. Zusätzlich wurde ein Fragebogen zu einem Lichtassistenzsystem vorgegeben.

Die Versuchspersonen beurteilten ihre Müdigkeit anhand der oben dargestellten Skala verbal. Dies wurde mit einem Audioaufzeichnungsgerät erfasst. Gleichzeitig notierte der Versuchsleiter den entsprechenden Wert.

Die vorhandene Infrarotkamera wurde zur Aufnahme des Gesichtes bzw. des Oberkörpers der Versuchspersonen eingesetzt um die spätere objektive Müdigkeitsbewertung zu ermöglichen.

3.2.3 Simulationsszenario

Die gesamte Simulationsstrecke wurde als Nachtsimulation realisiert (Abbildung 19) um ein möglichst schnelles Ermüden der Testfahrer zu erreichen.

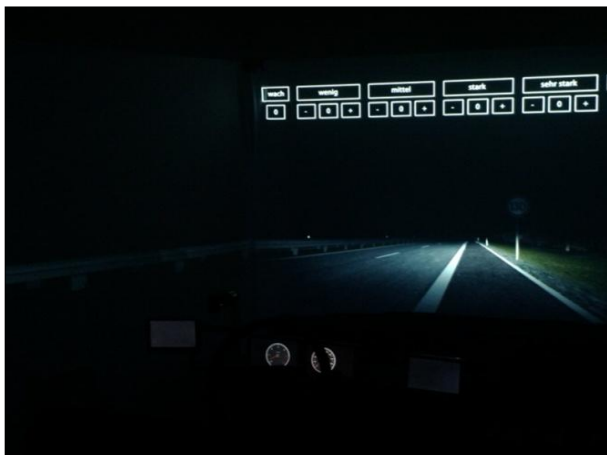


Abbildung 19: Simulierte Autobahnnachtstrecke mit eingeblendeter Müdigkeitsskala.

Die Simulationsstrecke setzte sich aus zwei Abschnitten zusammen. Der erste Teilabschnitt bestand aus einer zweispurigen Autobahn (Abbildung 19) mit einer Gesamtlänge von 140 km. Diese Autobahnstrecke bestand aus zehn jeweils identisch aufgebauten 14 km langen Teilabschnitten die übergangslos miteinander verbunden waren. Auf der eigenen Fahrbahn befand sich kein weiterer Verkehrsteilnehmer. Auf der Gegenfahrbahn wurden in randomisierter Abfolge Verkehrsteilnehmer präsentiert. Die Geschwindigkeitsvorgabe wurde durch Schilder am Straßenrand umgesetzt.

Diese Schilder waren mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h beschrieben.

Der zweite Teilabschnitt setzte sich aus einer einspurigen Landstraße (Abbildung 20) mit einer Gesamtlänge von 98 km zusammen. Diese Landstraße bestand aus sieben jeweils gleich aufgebauten 14 km langen Teilabschnitten, die übergangslos miteinander verbunden waren. Auf der eigenen Fahrspur gab es hier ebenfalls keinen Verkehr. Auf der Gegenseite wurde wiederum randomisiert Verkehr eingespielt. Die Geschwindigkeitsvorgabe wurde durch Schilder am Straßenrand umgesetzt, wobei hier eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h vorgegeben wurde.



Abbildung 20: Simulierte Landstraßennachtstrecke mit eingeblendeter Müdigkeitsskala.

Wie bereits erwähnt wurden für beiden Strecken (Autobahn & Landstraße) jeweils 14 km lange Sequenzen verwendet, die abwechselnd aus Geraden und langgezogenen Links- sowie Rechtskurven bestanden. Die Länge der geraden Teilstücke variierte zwischen 200 m und 700 m, die Kurven zwischen 1000 m und 2500 m. Beide Teilabschnitte (Autobahn und Landstraße) waren durch eine Autobahnauf- bzw. abfahrt miteinander verbunden, welche eine Gesamtlänge von 150 m aufwies.

Am Ende der Strecke wurde noch eine Stadtdurchfahrt simuliert, in der sich ein kritisches Ereignis ereignete. Für eine genaue Darstellung dieses kritischen Ereignisses wird auf Reinprecht, Muhrer und Vollrath (2011b) verwiesen, da diese nicht Inhalt der Dissertation ist.

3.2.4 Experimentelles Design

In der Untersuchung soll das Fahrverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeit untersucht werden. Allerdings kann die Müdigkeit als unabhängige Variable (UV) nicht exakt manipuliert und per Zufall zugewiesen werden. Es wurde versucht, Müdigkeit durch unterschiedliche Faktoren (z.B. Tageszeit, Versuchsdauer, usw.) zu induzieren, so dass die unterschiedlichen vorgefundenen Müdigkeitsstufen verglichen werden können. Damit handelt es sich um ein quasi-experimentelles Design.

Als erste unabhängige Variable wurden die Müdigkeitsstufen verwendet. Diese wurden nach dem Schema aus Kapitel 3.2 gebildet, wobei nur die Fremdreferenzierung verwendet wurde. Zur einfacheren Lesbarkeit wurden den 3 Stufen entsprechende Farbkodierungen zugeordnet, wobei grün den wachen Zustand, gelb den

mittleren Müdigkeitszustand und die rote Farbkodierung die müden und sehr müden Fahrer repräsentiert. Durch diese Einteilung ergibt sich die erste unabhängige Variable, die 3-fach gestuft vorliegt (grün, gelb, rot).

Als zweite Variable wurde der Straßentyp als unabhängige Variable aufgenommen, welche zweifach gestuft vorliegt (Autobahn und Landstraße). Der Faktor Streckenart wurde in ausbalancierter Reihenfolge vorgegeben. Insgesamt ergibt sich somit ein 2x3 (2 x Straßentyp x 3 Müdigkeitsstufen). Design mit Messwiederholung auf beiden Faktoren.

Die Zellenbesetzung ist zur besseren Übersicht vor den jeweiligen statistischen Berechnungen angeführt.

3.2.5 Stichprobe

Die Akquise der Versuchspersonen erfolgte durch Aushänge am Institut für Psychologie der TU Braunschweig sowie aus dem vorhandenen Probandenpool.

Ausschlusskriterien für die Teilnahme an der Untersuchung waren vorliegende medizinische Schlafstörungen, die Einnahme von Medikamenten, welche die Verkehrssicherheit gefährden sowie Alkohol und Drogenkonsum. Diese Ausschlusskriterien gelten für alle nachfolgenden Untersuchungen in dieser Arbeit.

An der ersten Simulatorstudie nahmen 32 Personen teil, wovon vier aufgrund von Übelkeit die Fahrt abbrechen mussten und somit nicht in die Auswertung aufgenommen wurden. Die Stichprobe enthält somit 28 Versuchspersonen (15 Männer und 13 Frauen). Der Altersdurchschnitt liegt bei 39.2 Jahren mit einer Standardabweichung von 14.0 Jahren. 11 Personen davon studieren, 9 befinden sich in einem Angestelltenverhältnis, zwei sind Arbeiter und fünf Personen gehen sonstigen Tätigkeiten nach.

Für die vorliegende Stichprobe zeigt sich für die durchschnittliche Schlafdauer der letzten Nacht ein Mittelwert von 7.0 Stunden mit einer Standardabweichung von 1.3 Stunden. Diese Schlafdauer unterscheidet sich nicht signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer der Versuchspersonen an anderen Tagen (t-test für abhängige Stichproben: $t_{(27)} = -.23$; $p = .818$). Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Durchschnitt 11.5 Stunden mit einer Standardabweichung von 2.9 Stunden.

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Mittel 18.000 km (SD = 14.000 km) fahren. Dieser Wert liegt etwa 3.000 km über dem bundesdeutschen Durchschnitt (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2010). Hinsichtlich der Fahrerfahrung wird die bisherige Gesamtfahrleistung verwendet, welche sich auf den Zeitraum seit Führerscheinerwerb bezieht und somit sämtliche bis dato gefahrene Kilometer beinhaltet. Als Einschränkung sei hier erwähnt, dass es sich um eine eigene Hochrechnung bzw. Schätzung der Versuchspersonen handelt und daher mit Vorsicht zu betrachten ist. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt in dieser Stichprobe bei einem Mittelwert von 518.000 km (SD = 932.000 km) (Median = 300.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung erstreckt sich dabei von 1.700 km bis zu 5.000.000 km. Somit zeigt sich in der Stichprobe ein sehr breites Spektrum an Fahrerfahrung.

Diese spiegelt sich auch in der Dauer des Führerscheinbesitzes wieder. Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 20.8 Jahre in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B

bzw. 3 (SD = 13.6). Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gesamten bisherigen Fahrleistung und der Jahre des Führerscheinbesitzes ($r = .498$; $p = .007$). Kein signifikanter Zusammenhang findet sich hingegen zwischen den Variablen jährliche Fahrleistung und Führerscheinbesitz ($r = .095$; $p = .630$).

3.2.6 Versuchsdurchführung

Die Versuche fanden im Zeitraum von Februar bis März 2010 statt und begannen um 20 Uhr. Nach der Begrüßung der Versuchsperson wurde ihr erklärt, dass es darum geht, das Fahrverhalten auf Autobahnen und Landstraßen zu untersuchen. Im Anschluss daran wurde kurz das Versuchsszenario erklärt und mitgeteilt, dass der Müdigkeitszustand der Versuchspersonen aufgrund der späten Fahrt protokolliert wird.

Nachdem die Person die Einwilligungserklärung unterschrieben hatte, in der sie sich bereit erklärte, dass ihre Daten für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden und in anonymisierter Form gespeichert werden dürfen, wurde ein soziodemographisches Datenblatt vorgegeben. Hier wurden sämtliche Daten hinsichtlich der Person wie z.B. Alter, Geschlecht, Beruf, Fahrleistung, Führerscheinbesitz usw. erfasst.

Nach dem Ausfüllen wurde der Versuchsperson eine schriftliche Instruktion für die bevorstehende Trainingsfahrt sowie die darauf folgende Untersuchungsfahrt vorgelegt. Zusätzlich beinhaltete die Instruktion noch eine Erklärung des Fahrsimulators sowie der Selbstbewertungsskala der Müdigkeit. Nachdem die Person dies gelesen hatte, wurde Sie zum Fahrsimulator begleitet.

Dort wurde zuerst der Fahrersitz entsprechend der Größe der Versuchsperson eingestellt. Dann wurde nochmals erklärt, dass es sich beim Fahrsimulator um ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe handelt und somit keine Schaltvorgänge notwendig sind. Des Weiteren wurden noch sämtliche Schalter (Blinker, Fernlichtschalter) erklärt und darauf hingewiesen welche TFT-Displays welche Funktionen besitzen. Bei eventuellen Rückfragen wurden diese durch den Versuchsleiter geklärt.

Sofern keine Fragen mehr offen waren wurde die Trainingsstrecke durch den Versuchsleiter gestartet. Diese bestand aus einer Nachtsimulation und hatte den Zweck, die Versuchsperson mit dem Simulator vertraut zu machen. Der Versuchsleiter kontrollierte ca. alle fünf Minuten ob sich bei der Versuchsperson das Befinden veränderte bzw. es Anzeichen von Übelkeit oder Schwindel gab. Waren diese vorhanden, so wurde die Trainingsfahrt sofort abgebrochen. Sofern keines dieser Anzeichen auftrat, wurde die Trainingsfahrt nach 20 Minuten beendet. Die Dauer der Trainingsfahrt wurde auf Grund von Erfahrungen aus vorangegangenen Fahrsimulatoruntersuchungen gewählt, in denen sich zeigte, dass nach dieser Dauer die Versuchspersonen mit dem Fahrsimulator sowie mit den Fahrzeugreaktionen vertraut sind.

Die Versuchsperson wurde dann gebeten nochmals in den Kontrollraum zu kommen und dort den Fragebogen zur Befindlichkeit auszufüllen. Danach wurde die Versuchsperson wieder gebeten sich in den Fahrsimulator zu setzen. Für die spätere objektive Fremdbewertung der Müdigkeit wurde die vorhandene Infrarotkamera so auf die Versuchsperson ausgerichtet, dass das Gesicht möglichst großflächig im Fokus der Kamera zu sehen war.

Vor Beginn der eigentlichen Versuchsstrecke wurde die gesamte subjektive Müdigkeitsskala von „wach 0“ bis „sehr stark +“, durch die Versuchsperson vorgelesen und mit dem Audioaufzeichnungsgerät aufgenommen. Ebenfalls wurde zum gleichen Zeitpunkt die Aufzeichnung mit Hilfe der Infrarotkamera gestartet. Zusätzlich wurde der Teilnehmer daran erinnert, dass sofort nach Start der Versuchsstrecke ein Gong zu hören ist, er dann seinen aktuellen Müdigkeitsstatus sagen solle und sich dies in regelmäßigen Abständen wiederhole.

Nachdem dies geschehen war wurde die eigentliche Versuchsstrecke gestartet. Die Aufzeichnung der Sprachdaten der Versuchsperson wurde manuell alle 10 Minuten vom Versuchsleiter gestartet. Dieser hatte die Aufgabe, die Aufzeichnung immer möglichst zeitnah zur Einblendung der subjektiven Müdigkeitsskala zu starten und danach gleich wieder zu beenden. Zusätzlich wurden die verbalen Müdigkeitsäußerungen der Versuchsperson durch den Versuchsleiter in einer dafür vorgesehen Skala eingetragen. Die Aufzeichnung des Infrarotvideos lief während der gesamten zweistündigen Versuchsfahrt.

Im Anschluss daran füllte die Versuchsperson noch einmal den Fragebogen zur Befindlichkeit aus sowie den Fragebogen zum Thema Autofahren und Müdigkeit. Zum Schluss wurde die Vergütung für die Teilnahme am Versuch ausbezahlt und die Person verabschiedet. Die Gesamtdauer der kompletten Versuchsdurchführung lag bei ca. 3 Stunden.

3.2.7 Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung

Während des Versuches wurden Fahrdaten, Videodaten, Sprachdaten und die subjektive Bewertung der Müdigkeit aufgezeichnet. Aus den Fahrdaten wurden spezifische Parameter ausgewählt. Diese Auswahl orientiert sich am 3-Ebenen-Modell der Fahraufgabe und soll hier kurz erklärt werden.

In dieser speziellen monotonen Situation geht es vor allem darum, das Fahrzeug auf der Spur zu halten (Stabilisierungsebene) sowie die passende Geschwindigkeit (Führungsebene) nach Vorgabe zu wählen. Um diese Aspekte der Stabilisierungs- und Führungsebene zu erfassen wurden zum einen die entsprechenden Fahrparameter aufgezeichnet zum anderen auch das Bedienverhalten (Gas-, Bremspedalstellung, Lenkradstellung) der Fahrer erfasst.

Im speziellen waren dies Parameter...:

- ...des Lenkverhaltens (Standardabweichung und absolut größter Lenkausschlag)
- ...der Spurhaltung (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum, TDLC, TLC)
- ...des Geschwindigkeitsverhaltens (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum)

Als Variablen wurden jene ausgewählt, die auf Grundlage der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2.6.1) sensitiv auf Müdigkeit reagieren. Zu diesen Variablen wurden noch Daten über die befahrene Strecke (Autobahn bzw. Landstraße) und über die

genaue Zeit der Einblendung der subjektiven Müdigkeitsskala in die Simulation mit aufgezeichnet.

Die Videoaufzeichnung startete kurz vor dem Versuch und endete kurz nach dem Ende der Versuchsfahrt. Die Aufzeichnungsrate lag bei 40 Hz. Die Aufzeichnung der verbalen Äußerungen der Fahrer erfolgte über ein Audioaufnahmegerät jeweils alle 10 Minuten. Zudem wurden diese Daten vom Versuchsleiter in eine Skala eingetragen.

Die Fahrdaten wurden mit dem Analysetool „Diadem 2011“ (National Instruments, 2011) aufbereitet. Die Aufbereitung der Videoaufnahme erfolgte mit dem Programm „Windows Live Movie Maker 2011“ (Microsoft Corporation, 2011).

Um eine Zuordnung der Fahrdaten bzw. Videodaten zu den subjektiven Müdigkeitswerten zu ermöglichen, wurden sämtliche Datensätze in jeweils 10-Minutenabschnitte unterteilt. Dies wurde gewählt, da dies ebenfalls der Rhythmus der subjektiven Müdigkeitserhebung war.

Da in dieser Arbeit auch ein Vergleich von simulierten und realen Fahrbedingungen beleuchtet werden sollen, folgt als nächste Studie die erste Realfahrtstudie, welche ebenfalls aus einer Landstraße sowie einem Autobahnabschnitt bestand.

3.3 Methode Studie 2: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Realverkehr (Autobahn und Landstraße)

3.3.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug diente ein Fahrzeug der Kompaktklasse (Opel Astra) als Dieselausführung mit 125 PS. Es handelte sich hierbei um ein Fahrzeug mit Sechsgangschaltung. Das Fahrzeug war bis auf kleine Änderungen ein Fahrzeug aus der aktuellen Verkaufsserie. Diese Änderungen bezogen sich auf eine Spurkamera (TLC-Kamera) die für die Spuraufzeichnung sowie für das Erkennen von Vorderfahrzeugen in der Nähe des Mittelspiegels angebracht war.

Für die vorgesehene objektive Fremdbewertung der Müdigkeit war für die Videoaufzeichnung der Fahrer sowie für die Sprachaufnahme zusätzliche Hardware notwendig (Abbildung 21). Diese bestand aus zwei Infrarotkameras und einem Mikrofon. Eine Infrarotkamera war hinter dem Lenkrad befestigt und filmte das Gesicht des Fahrers, die zweite war in der Mittelkonsole, vor dem Multi-Informationdisplay montiert, und filmte den Oberkörper des Testfahrers. Beide Kameras wurden durch einen Infrarotscheinwerfer beleuchtet. Das Mikrofon für die verbalen Äußerungen der Fahrer war ebenfalls hinter dem Lenkrad befestigt.



Abbildung 21: Versuchsaufbau für die Müdigkeitsfahrten im Realfahrzeug.

Für die Aufzeichnung der Fahrdaten wurde ein Datenkabel vom Fußraum des Fahrers bis zur Rücksitzbank verlegt. Über dem Drehzahlmesser war ein Abdeckstreifen geklebt, da sich dahinter die Warnlampe für den Spurverlassenswarner befand. Die Sicht nach außen sowie zu den übrigen Instrumenten (Geschwindigkeitsanzeige, Tankgeber, Temperatugeber, usw.) war durch die installierte Messtechnik nicht beeinträchtigt.

3.3.2 Müdigkeitsreferenzierungssystem

Für die Selbst- als auch für die Fremdbewertung der Müdigkeit wurden dieselben Skalen wie in Studie 1 verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der beiden Skalen findet sich in Kapitel 3.2.1.3.

3.3.3 Sonstiges Versuchsmaterial

Das in Studie 1 eingesetzte „sonstige Versuchsmaterial“ wurde auch hier verwendet. Die genaue Darstellung dieses Materials kann aus Kapitel 3.2.2 entnommen werden.

Um die Fahrdaten aufzuzeichnen, wurde zusätzlich ein Messlaptop der Firma Dell verwendet. Des Weiteren war ein Luxmeter Type „LX-1108“ der Firma Voltcraft im Fahrzeug montiert, um die Umgebungshelligkeit zu messen. Die Aufzeichnung der verbalen Müdigkeitswerte der Versuchspersonen erfolgte durch den Versuchsleiter welcher den Müdigkeitswert auf einer Vorlage notierte.

3.3.4 Streckenbeschreibung

Die Versuchsstrecke wurde in Anlehnung an Studie 1 gewählt. Zudem wurde auch hier darauf geachtet, dass die Strecke eine möglichst schnelle Ermüdung der Versuchsteilnehmer ermöglicht. Start und Endpunkt war jeweils die Abteilung für Ingenieur- und Verkehrspsychologie in der Gaußstraße in Braunschweig. Startete der Versuch auf der Autobahn, so ging es vom Startpunkt aus durch die Stadt Braunschweig auf die Autobahn A39 bis nach Baddeckenstedt und von dort über die A7 nach Hannover. Von Hannover aus ging es über die A2 bis zur Ausfahrt Lauenau.

Diese stellte auch das Ende des Autobahnabschnittes dar, der eine Gesamtlänge von 130 km aufwies.

Von dort aus führte der Weg über die Landstraßen B442 in Richtung Bad Münster am Deister und von dort aus weiter über die B217 in Richtung Giesen, weiter auf der B494 Richtung Hohenhameln und über Ilsede und der B1 zurück nach Braunschweig (Abbildung 22). Insgesamt teilte sich die Strecke damit in zwei Bereiche. Die Gesamtlänge der Landstraße ergab hier ca. 104 km.

Die Probanden brauchten etwas mehr als drei Stunden um die gesamten 234 Kilometer zurückzulegen. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der Strecke war die zu erwartende Verkehrsdichte, die möglichst gering sein sollte. Da es sich bei der Autobahn A2 sowie A7 um zwei Hauptverkehrsrouten in Deutschland handelt wurden vor dem Versuch Pilotfahrten durchgeführt, um einen Eindruck über die Verkehrsdichte zu bekommen. Es zeigte sich, dass beide Autobahnen zur Versuchszeit (ab 20 Uhr abends) nur eine geringe bis mittlere Verkehrsdichte aufwiesen. Die Bundesstraßen zeigten ebenfalls nur eine geringe Verkehrsdichte.

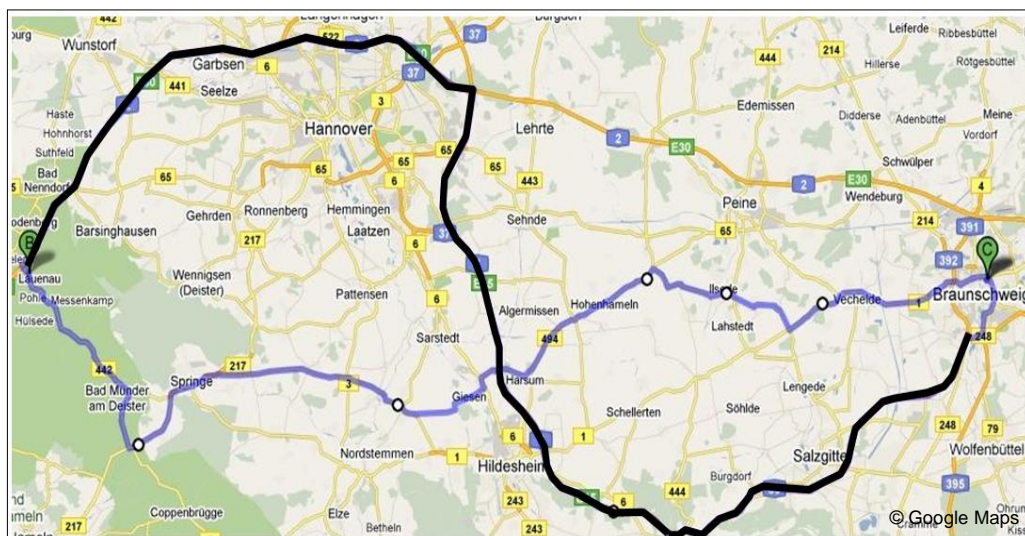


Abbildung 22: Realstrecke der Müdigkeitsfahrten in Studie 2 (Autobahn in schwarz, Landstraße in blau).

3.3.5 Experimentelles Design

Das experimentelle Design stellt sich gleich wie in Studie 1 dar. Als erste unabhängige Variable wird die Zuteilung der Versuchspersonen zu den drei in Kapitel 3.2.4 genannten Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) verwendet.

Durch die zwei Streckenabschnitte (Autobahn und Landstraße) ergibt sich wiederum die zweite unabhängige Variable, die 2-fach gestuft vorliegt. Somit ergibt sich ein 2x3 Versuchsplan mit Messwiederholung auf beiden Faktoren.

Die Anzahl der Zellenbesetzung ist zur besseren Übersicht vor den jeweiligen statistischen Berechnungen angeführt.

3.3.6 Stichprobe

Die Akquise der Versuchspersonen erfolgt durch Aushänge am Institut für Psychologie der TU Braunschweig sowie aus dem vorhandenen Probandenpool.

An der zweiten Studie nahmen 27 Personen (16 Männer und 11 Frauen) teil, wovon keine die Untersuchung aufgrund von zu starker Müdigkeit oder sonstigen Faktoren abbrechen musste. Der Altersdurchschnitt liegt bei 26.7 Jahren ($SD = 8.8$). Vom Tätigkeitsprofil zeigt sich, dass 19 Personen studieren, zwei in einem Angestelltenverhältnis stehen, eine Person selbstständig ist und fünf einer sonstigen Tätigkeit nachgehen.

Die durchschnittliche Schlafdauer in der Nacht vor dem Versuch beträgt bei der vorliegenden Stichprobe 6.7 Stunden ($SD = 1.5$). Diese Schlafdauer unterscheidet sich signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer der Versuchspersonen an anderen Tagen (t-test für abhängige Stichproben: $t_{(26)} = -2.41$; $p = .023$), wobei in der Nacht vor dem Versuch weniger (6.7 Stunden) geschlafen wurde als in einer Durchschnittsnacht (7.4 Stunden). Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Mittel 11.2 Stunden mit einer Standardabweichung von 2.5 Stunden.

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Schnitt 13.000 km ($SD = 11.000$) fahren. Dieser Wert liegt etwa 2.000 km unter dem bundesdeutschen Durchschnitt (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2010), welcher bei 15.000 km liegt. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt in dieser Stichprobe bei einem Mittelwert von 292.000 km ($SD = 959.000$ km) (Median = 40.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung erstreckt sich von 1.500 km bis 5.000.000 km. Somit zeigt sich in der Stichprobe ein engeres Spektrum an Fahrerfahrung im Vergleich zu Studie 1.

Betrachtet man die Dauer des Führerscheinbesitzes, so ergibt sich ein relativ kleines Spektrum. Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 9.8 Jahre ($SD = 8.6$) in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B bzw. 3. Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gesamten bisherigen Fahrleistung und der Jahre des Führerscheinbesitzes ($r = .863$; $p = .000$). Zwischen den Variablen jährliche Fahrleistung und Führerscheinbesitz zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Zusammenhang ($r = .537$; $p = .004$). Auch für die beiden Variablen Alter und jährliche Fahrleistung zeigt sich eine positive Korrelation ($r = .534$; $p = .004$).

3.3.7 Versuchsdurchführung

Die Untersuchung fand im Zeitraum von Juni bis Juli 2010 jeweils ab 20 Uhr statt. Nach der Begrüßung der Versuchsperson wurden eine Einwilligungserklärung und ein soziodemographisches Datenblatt durch den Versuchsleiter vorgegeben. Den Teilnehmern wurde erklärt, dass es sich um eine Studie handelt, bei der das Fahrverhalten im Realverkehr untersucht werden soll. Aufgrund der späten Versuchszeit sollte aus Sicherheitsgründen die Müdigkeit erhoben werden.

Des Weiteren wurden der Person ein Fahrtenbuch sowie eine Sicherheitsunterweisung vorgelegt. Eine Erklärung des Fahrzeuges wurde durch eine mündliche Instruktion gegeben.

Die Erklärung über die Selbstbewertungsskala der Müdigkeit wurde wieder in schriftlicher Form vorgegeben, genauso wie die Instruktion für den Versuch. Sollten sich Fragen über den Versuchsablauf, beim Ausfüllen der Datenblätter oder über das Fahrzeug ergeben haben, wurden diese durch den Versuchsleiter beantwortet. Es wurde darauf hingewiesen, dass der Versuch jederzeit durch die Versuchsperson abgebrochen werden kann (z.B. auf Grund von Müdigkeit, Übelkeit o.ä.). Zusätzlich wurde die Versuchsperson nochmals darauf hingewiesen, dass nur die Verwendung von fahrrelevanten Systemen gestattet ist. Die Verwendung von Assistenz- (z.B. Tempomat, Spurhalteassistent, usw.) oder Infotainmentsystemen (Radio, usw.) war strikt untersagt. Ferner durfte nicht mit dem Versuchsleiter gesprochen werden. Ausnahme war die Müdigkeitsäußerung bzw. wenn die Versuchsperson den Versuch aus beliebigen Gründen abbrechen wollte.

Sofern keine Fragen offen waren, wurden die Infrarotkameras auf die Versuchsperson ausgerichtet. Eine wurde dabei für das Filmen des Gesichts verwendet, die Zweite filmte den Oberkörper. Nach dieser Justierung wurde die Selbstbewertungsskala wieder komplett durch den Teilnehmer vorgelesen und diese Äußerungen mit einem Audioaufnahmegerät aufgenommen.

Im Anschluss daran startete die Versuchsfahrt. Gleichzeitig wurde die Aufnahme der Fahr- und Videodaten gestartet, der Helligkeitswert notiert und der Müdigkeitsstatus der Person durch den Versuchsleiter erfragt. Diese Äußerung wurde wieder mit dem Audioaufnahmegerät aufgenommen und auf einem Antwortblatt durch den Versuchsleiter notiert, um bei technischen Problemen diese Aufzeichnung heranziehen zu können. Während des Versuches wurden die Streckenanweisungen verbal durch den Versuchsleiter gegeben. Alle zehn Minuten wurden die subjektive Müdigkeit und die Umgebungshelligkeit aufgezeichnet.

Nachdem die Fahrt nach ca. drei Stunden beendet war, wurde der Fragebogen zum Autofahren und Müdigkeit (Muhrer & Reinprecht, 2010) vorgegeben. Dem Abschluss des Versuches stellten die Vergütung für die Teilnahme am Versuch und die Verabschiedung dar.

3.3.8 Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung

Die Datenaufzeichnung der Fahrdaten im Realfahrzeug erfolgt durch die Messsoftware CANape in der Version 9.0 der Firma Vector Informatik GmbH (2009). Für die Aufzeichnung wurden der Low- und Highspeed CAN des Fahrzeuges mittels eines CANcaseXL, ebenfalls der Firma Vector, an den Messlaptop angeschlossen. Von den Fahrdaten wurde unter anderem

- der Lenkradwinkel
- die Fahrzeuggeschwindigkeit
- die Spurhaltung
- die Blinkerbetätigung
- usw.

aufgezeichnet. Insgesamt wurden ca. 4800 Signale von den CAN-Bussen aufgezeichnet. Die Bandbreite der Aufzeichnungsrate variierte zwischen 1 Hz und 100 Hz bzw. nur einer ereignisgetriggerten Aufzeichnung (z.B. Blinkerbetätigung).

Die Aufzeichnung der beiden Videosignale der Infrarotkameras wurde zeitsynchron mit der Fahrdatenaufnahme durch CANape gestartet und die Aufzeichnung erfolgte ebenfalls fortlaufend. Die Taktfrequenz der Infrarotkameras betrug 25 Hz. Die subjektive Müdigkeitsbewertung wurde ebenfalls wieder alle 10 Minuten aufgezeichnet.

Die Datenaufbereitung der Fahrdaten erfolgte durch das Programm MATLAB (MathWorks, 2011). Hierbei wurden durch ein CAN-Database-File (.dbc-file) die Daten vom CANbus in ein lesbares Format umgewandelt. Nach der Umwandlung der Daten in numerische Werte wurden aus den ca. 4800 Signalen die vorab bestimmten Signale mittels eines Matlabscripts extrahiert.

Für die weitere Verarbeitung wurden die Daten in das Programm Diadem importiert. Dort wurden die Daten wieder, analog zu Studie 1, in 10-Minutenabschnitte aufgeteilt um eine Zuordnung der Daten zu den Müdigkeitswerten zu gewährleisten. Die Videodaten wurden, ebenfalls wie in Studie 1, in 10-Minutenabschnitte aufgesplittet.

Da es sich hier um einen Realfahrtstudie handelt, sind die Messdaten nicht immer plausibel, da z.B. Spurmarkierungen nicht richtig bzw. gar nicht erkannt werden. Aus diesem Grund wurden bestimmte Kriterien an die aufgezeichneten Fahrdaten angelegt um für die weiteren statistischen Analysen verwendet zu werden.

Für die weiteren statistischen Analysen wurden unter folgenden Bedingungen Messdaten von den Analysen ausgeschlossen:

- Geschwindigkeit < 80 km/h
- Spurerkennungsgüte < 3 (= keine optimale Spurerkennung)
- Spurbreite > 3.85 m für den Autobahnabschnitt
- Spurbreite > 3.50 m für den Landstraßenabschnitt
- Blinkerbetätigung inkl. 3 Sekunden danach
- Spurwechsel ohne Blinkerbetätigung

Dieses Vorgehen wurde gewählt um sicherstellen zu können, dass in die Auswertung nur Daten aufgenommen werden, deren Qualität ein Mindestniveau aufweist. Die Geschwindigkeitsuntergrenze wurde mit 80 km/h festgelegt, da sich die meisten Müdigkeitsunfälle auf Landstraße und Autobahnen ereignen bei denen Geschwindigkeiten oberhalb dieser Grenze zu erwarten sind. Da die Spurerkennung automatisch durch ein Bildverarbeitungsprogramm erfolgt, welches Angaben über die Qualität der Spurerkennung mitlieferte, wurden nur jene Daten für die Analysen verwendet bei denen eine optimale Spurerkennung vorlag. Da diese automatischen Systeme nicht immer zuverlässige Werte liefern, wurde zusätzlich noch das Kriterium eingeführt, dass Daten nicht aufgenommen werden, wenn sie außerhalb der üblichen Spurbreiten für Autobahn bzw. Landstraße lagen. Daten, die während der Blinkerbetätigung sowie 3 Sekunden danach aufgezeichnet wurden, wurden ebenfalls aus der Analyse entfernt. Der Grund dafür war, dass die Annäherung an die Fahrspurmarkierung für den angezeigten Spurwechsel nicht fälschlicherweise als Müdigkeitsauswirkung gewertet wurde. Aus demselben Grund wurden auch die Daten eines nicht angezeigten

Spurwechsels aus den Analysen ausgeschlossen. Diese wurden dadurch erkannt, dass es zu einer sprunghaften Veränderung in der Spurbreite von einem Messzeitpunkt zum anderen kam (z.B. von 10 cm auf 3.50 m).

Wie sich in den beiden bisherigen Studien herausstellte, wurde durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Straßentypen (Autobahn sowie Landstraße) nur eine relativ geringe Müdigkeit bei den Versuchspersonen hervorgerufen. Zudem waren nur sehr wenige Personen vorhanden, von denen Fahrparameter in allen drei Müdigkeitsstufen vorlagen. Ebenso zeigte es sich, dass die Fahrdaten, welche auf der Landstraße erhoben wurden, mit einem sehr hohen Fehleranteil behaftet waren. Um diese Probleme zu beheben und dadurch mehr Daten von Fahrern mit höherer Müdigkeit zu erhalten, wurde eine weitere Realfahrtstudie durchgeführt.

3.4 Methode Studie 3: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Realverkehr II (Autobahn)

3.4.1 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug wurde dasselbe Fahrzeug wie in Studie 2 verwendet. Da keine Änderungen an dem Versuchsträger durchgeführt wurden, entfällt hier die detaillierte Darstellung des Fahrzeuges und es wird auf Kapitel 3.3.1 verwiesen.

3.4.2 Müdigkeitsreferenzierungssystem

Als Müdigkeitsskala für die Fremd- als auch für die Selbstbewertung wurden ebenfalls die bereits detailliert beschriebenen Skalen aus Kapitel 3.2.1.3 verwendet.

3.4.3 Sonstiges Versuchsmaterial

Als zusätzliches Versuchsmaterial kamen außer die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Fragebögen keine weiteren Materialien zum Einsatz.

3.4.4 Streckenbeschreibung

Durch Pilotfahrten, die vor Studienbeginn durchgeführt wurden, konnten zwei Strecken identifiziert werden, die zum einem für den Müdigkeitsversuch lang genug waren und zum anderen auch bezüglich der Verkehrsdichte den Anforderungen genügten (geringe Verkehrsdichte).

Die Strecke führte vom Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie in der Gaußstraße (Abbildung 23, „A“) über die A2 Richtung Berlin. Bei der Autobahnabfahrt „80 Lehnin“ (Abbildung 23, „B“) wurde gewendet und wieder zurück zum Ausgangspunkt gefahren. Insgesamt ergab sich eine Länge der Versuchsstrecke von ca. 333 km. Die Gesamtfahrdauer betrug ca. 3 Stunden 20 Minuten.

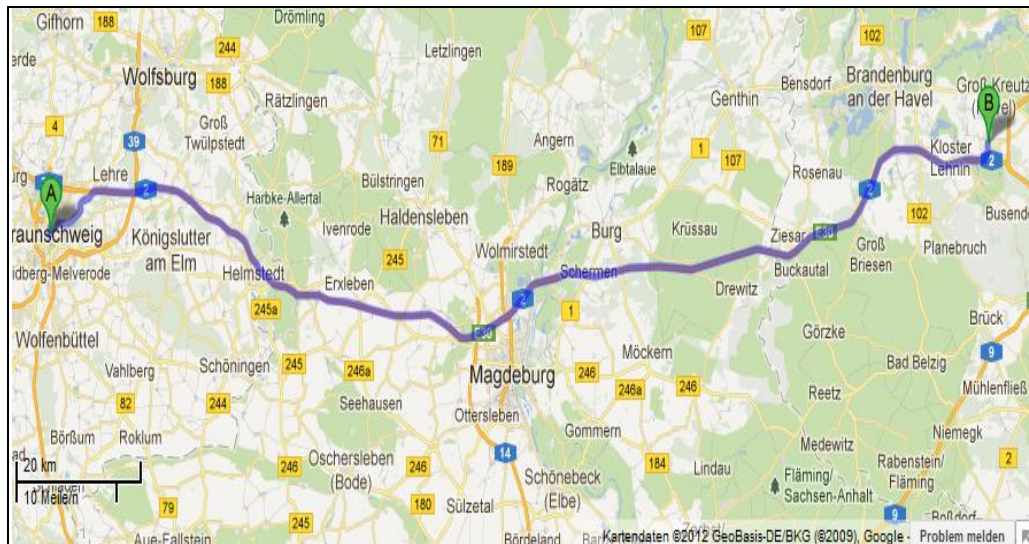


Abbildung 23: Realstrecke der Müdigkeitsfahrten in Studie 3.

3.4.5 Experimentelles Design

Das experimentelle Design stellt sich in ähnlicher Weise dar wie in der ersten Realfahrtstudie (Kapitel 3.2.4). Es verringert sich allerdings die Anzahl an unabhängigen Variablen auf nur eine Variable, da nur noch die Autobahn als Streckentyp verwendet wurde.

Somit ergibt sich ein 1-faktorieller Versuchsplan, wobei der unabhängige Faktor „Müdigkeitsstufe“ dreifach gestuft vorliegt (grün, gelb, rot).

Die Darstellung der Anzahl an Zellenbesetzungen erfolgt wieder vor den jeweiligen statistischen Analysen.

3.4.6 Stichprobe

Die Akquise der Versuchspersonen erfolgte durch Aushänge am Institut für Psychologie der TU Braunschweig sowie aus dem vorhandenen Probandenpool.

An der zweiten Realfahrtstudie nahmen 20 Personen (13 Männer und 7 Frauen) teil, wovon niemand die Untersuchung aufgrund von Müdigkeit oder sonstigen Faktoren abbrechen musste.

Der Altersdurchschnitt liegt bei 31.1 Jahren mit einer Standardabweichung von 10.9 Jahren. Vom Tätigkeitsprofil zeigt sich, dass 11 Personen noch studieren, fünf in einem Angestelltenverhältnis stehen, eine Person selbstständig, eine Person arbeitssuchend ist und ein Teilnehmer einer sonstigen Tätigkeit nachgeht.

Für die vorliegende Stichprobe zeigt sich eine durchschnittliche Schlafdauer von 7.1 Stunden (SD = 1.7) in der Nacht vor dem Versuch. Diese Schlafdauer vor dem Versuchstag unterscheidet sich nicht signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer (MW = 7.3; SD = .9) der Versuchspersonen (t-test für abhängige Stichproben: $t_{(18)} = -.54$ $p = .595$) an anderen Tagen. Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Mittel 11.1 Stunden mit einer Standardabweichung von 3.0 Stunden.

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Schnitt 14.000 km (SD = 7600 km) fahren. Dieser Wert liegt etwa 1.000 km unter dem bundesdeutschen Durchschnitt (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2010) der bei

15.000 km liegt. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt in dieser Stichprobe bei einem Mittelwert von ca. 450.000 km (SD = 1.131.000 km) (Median = 100.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung reicht von 20.000 km bis 5.000.000 km. Somit zeigt sich in der Stichprobe ein einigermaßen breites Spektrum an Fahrerfahrung.

Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 14,5 Jahre (SD = 10,7) in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B bzw. 3. Es zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der gesamten bisherigen Fahrleistung und der Jahre des Führerscheinbesitzes ($r = .780$; $p = .000$). Zwischen den Variablen jährliche Fahrleistung und Führerscheinbesitz zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Zusammenhang ($r = .582$; $p = .007$). Auch für die beiden Variablen Alter und jährliche Fahrleistung zeigt sich eine positive Korrelation ($r = .608$; $p = .004$). Untersucht man die Variablen durchschnittlicher Schlaf und Alter, so zeigt sich ein signifikant negativer Zusammenhang ($r = -.651$; $p = .003$).

3.4.7 Versuchsdurchführung

Die Untersuchung fand im Zeitraum von März bis April 2011 jeweils ab 20 Uhr abends statt. Da sich der Versuchsablauf zu jenem aus der ersten Realfahrtstudie nicht unterscheidet wird für eine genaue Darstellung des Ablaufs auf Kapitel 3.3.7 verwiesen.

3.4.8 Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung

Die Datenaufzeichnung und -aufbereitung erfolgte mit den gleichen Geräten bzw. den entsprechenden Programmen wie in Kapitel 3.3.8 beschrieben wurde.

Durch diese Studie ergab sich eine größere Anzahl an auswertbaren Datensätzen. Ebenso wurde durch die geänderte Streckenführung und die Verwendung einer reinen Autobahnstrecke höhere Müdigkeit bei den Testfahrern festgestellt. Um zusätzlich zu den Fahrdaten noch weitere Daten für die Müdigkeitsdetektion verwenden zu können, wurde eine zweite Simulatorstudie durchgeführt. Hierbei war das vorrangige Ziel, in einer kontrollierten Umgebung Blick- und Sprachdaten zu erheben und mit diesen die Müdigkeitsdetektion zu verbessern.

3.5 Methode Studie 4: Nachtfahrten unter Müdigkeitseinfluss im Simulator II (Autobahn)

3.5.1 Fahrsimulator/Simulationssoftware

Da die Untersuchung wieder im High-Fidelity-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ingenieur- und Verkehrspsychologie stattfand wird für die detaillierte Beschreibung auf Kapitel 3.2.1.1 bzw. auf Kapitel 3.2.1.2 für die Simulationssoftware verwiesen.

3.5.2 Müdigkeitsreferenzierungssystem

Für die Erfassung der subjektiven Müdigkeitswerte der Versuchsteilnehmer wurde die bereits in den vorangegangenen Studien verwendete Müdigkeitsskala herangezogen. Für eine detaillierte Darstellung der Skalen wird auf Kapitel 3.2.1.3 verwiesen.

3.5.3 Blickerfassungssystem

Als Blickerfassungssystem diente das Head-Mounted-System Dikablis (Abbildung 24) der Firma Ergoneers. Das System ermöglicht es die Blickrichtung sowie die Bewegung der Augen und des Kopfes automatisch zu erfassen und auszuwerten. Das System besteht aus einer Brille mit zwei Infrarotkameras (Head-Unit). Eine davon filmt das Sichtfeld des Probanden (Field-Cam) d.h. die Szene, welche sich vor dem Probanden abspielt und eine zweite Kamera das Auge bzw. die Pupille (Eye-Cam).

Durch die Überlagerung beider Bilder ist eine automatische Erfassung und Auswertung der Blickrichtung möglich. Des Weiteren ist in der Halterung der Eye-Cam eine Infrarotdiode integriert. Diese ermöglicht es, auch bei Dunkelheit Versuche durchführen zu können, da ein exaktes Erkennen der Pupille durch die Beleuchtung der Diode gewährleistet ist. Weitere Bestandteile des Systems sind ein Laptop mit der Aufzeichnungssoftware (Record) sowie eine Kabelbox welche die Videosignale der Head-Unit für den Aufzeichnungsrechner in zwei Videokanäle teilt. Zusätzlich besteht das System aus sogenannten Markern (Abbildung 24). Diese dienen dazu, eine automatische Blickauswertung im Anschluss an den Versuch zu gewährleisten und müssen während der gesamten Aufzeichnung bzw. Versuchsdauer im Bild der Field-Cam vorhanden sein. Aus den Bildern der Field- und Eye-Cam errechnet die Aufnahmesoftware einen Blickvektor, der in einem Fixationskreuz mündet, welches in der Aufzeichnungssoftware angezeigt wird. Um eine exakte Auswertung der Fixationsorte zu erhalten ist es vor dem Versuch notwendig, die Blicksprünge von Punkt A zu Punkt B für jeden Probanden einzustellen. Hierfür dienen die Kalibrierungskreuze die in Abbildung 24 (rechts) zu sehen sind. Durch die Augenkamera, welches die Pupille filmt, ist es möglich die exakte Größe der Pupille für jeden Aufnahmetakt zu bestimmen.

Das Aufzeichnungsintervall des Systems liegt bei 40 Hz. Somit ergeben sich 25 Bilder pro Sekunde. Die Genauigkeit der Blickerfassung liegt unter 0.5° Sehwinkel (Ergoneers GmbH, 2009).

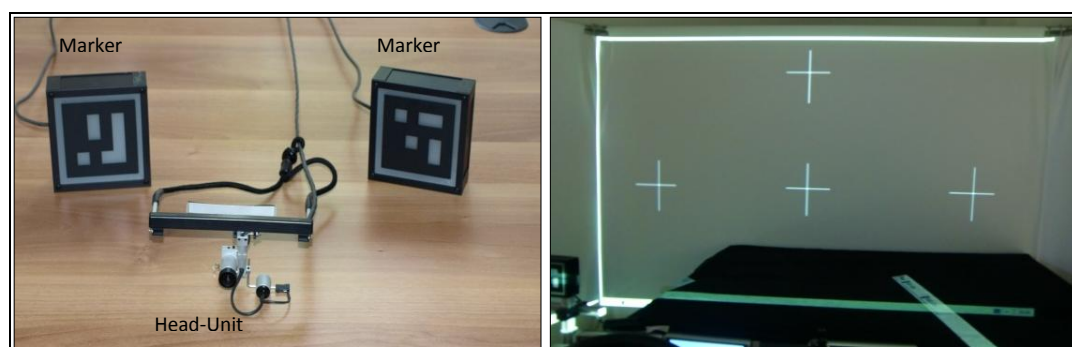


Abbildung 24: Dikablis Blickerfassungssystem bestehend aus Head-Unit & Markern (links), Kalibrierungskreuze im Feld (rechts).

3.5.4 Sonstiges Versuchsmaterial

Außer die in Kapitel 3.2.13.2.2 beschriebenen Versuchsmaterialien wurden keine zusätzlichen Materialien verwendet. Die genaue Beschreibung der verwendeten Materialien kann a Kapitel 3.2.1 entnommen werden.

3.5.5 Simulationsszenario

Für die Simulation wurde die gleiche Strecke wie in Kapitel 3.2.3 verwendet, der vorhandene Landstraßenabschnitt wurde jedoch durch einen zusätzlichen Autobahnabschnitt ersetzt. Somit setzt sich die simulierte Nachtstrecke aus 18 je 14 km langen Autobahnteilstücken zusammen. Die genaue Zusammensetzung der Autobahnteilstücke kann aus Kapiteln 3.2.3 entnommen werden.

Für die gesamte Fahrt auf der simulierten Autobahn benötigten die Versuchspersonen ca. 2 Stunden und legten dabei eine Distanz von 252 km zurück. Für die Geschwindigkeitsvorgabe wurden Schilder verwendet, die mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h beschriftet waren. Die restliche Gestaltung der Simulation unterscheidet sich nicht von jener aus Kapitel 3.2.3 und kann dort entnommen werden.

3.5.6 Experimentelles Design

Das experimentelle Design stellt sich in gleicher Weise dar wie in der zweiten Realfahrtstudie (Studie 3) (Kapitel 3.4.5). Auch hier verringert sich durch die veränderte Streckenführung die Anzahl an unabhängigen Variablen auf nur noch einen Faktor. Dieser stellt wieder die drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) dar. Somit ergibt sich ein 1-faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung.

3.5.7 Stichprobe

Die Akquise der Versuchspersonen erfolgt durch Aushänge am Institut für Psychologie der TU Braunschweig sowie aus dem vorhandenen Probandenpool.

An der zweiten Simulatorstudie nahmen 32 Personen (7 Männer und 25 Frauen) teil, wovon keine die Untersuchung aufgrund von Müdigkeit oder sonstigen Faktoren abbrechen musste. Der Altersdurchschnitt liegt bei 26.3 Jahren mit einer Standardabweichung von 11.6 Jahren. Vom Tätigkeitsprofil zeigt sich, dass 24 Personen noch studieren, zwei in einem Angestelltenverhältnis stehen, eine Person selbstständig ist und zwei Teilnehmer einer sonstigen Tätigkeit nachgehen.

In der Nacht vor dem Versuch betrug die durchschnittliche Schlafdauer in der vorliegenden Stichprobe 7.2 Stunden ($SD = 1.2$). Diese Schlafdauer unterscheidet sich nicht signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer ($MW = 7.4$; $SD = 1.2$) der Versuchspersonen (t -test für abhängige Stichproben: $t_{(28)} = -1.10$ $p = .279$) an anderen Tagen. Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Mittel 8.7 Stunden ($SD = 3.5$).

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Schnitt 9.000 km ($SD = 8700$ km) fahren. Dieser Wert liegt etwa 6.000 km unter dem bundesdeutschen Durchschnitt (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2010) der bei 15.000 km liegt. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt in dieser Stichprobe bei einem Mittelwert von ca. 253.000 km ($SD = 926.000$ km) (Median = 15.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung erstreckt sich von 3.000 km bis 5.000.000 km.

Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 9.7 Jahre ($SD = 11.8$) in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B bzw. 3. Betrachtet man die bisherige Fahrleistung und wie lange die Personen in Besitz einer Fahrerlaubnis sind, so zeigt sich ein tendenziell signifikanter Zusammenhang ($r = .358$; $p = .057$). Zwischen den Variablen jährliche

Fahrleistung und Führerscheinbesitz zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang ($r = .453$; $p = .014$). Auch für die beiden Variablen Alter und jährliche Fahrleistung zeigt sich eine positive Korrelation ($r = .432$; $p = .019$). Untersucht man die Variablen durchschnittlicher Schlaf und Alter, so zeigt sich ein tendenziell signifikant negativer Zusammenhang ($r = -.333$; $p = .077$).

3.5.8 Versuchsdurchführung

Die Versuche fanden im Zeitraum von November 2011 bis Februar 2012 statt. Die Durchführung des Versuches folgt dem gleichen Ablauf wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben. Zwischen der Trainingsfahrt und der Versuchsfahrt wurde lediglich noch die Kalibrierung des Blickerfassungssystems durchgeführt. Hierfür wurde der Versuchsperson die Brille aufgesetzt und dann die Pupillenerkennung optimiert. Im Anschluss daran erfolgt noch die Einstellung der Blicksprünge mit den in Abbildung 24 (rechts) abgebildeten Kreuzen. Danach konnte der Versuch gestartet werden.

Der restliche Ablauf des Versuches ist identisch mit dem in Kapitel 3.2.6 beschriebenen Versuch. Die gesamte Versuchsdauer lag, bedingt durch die Kalibrierung des Blickerfassungssystems bei ca. 2.5 Stunden, wobei die reine Fahrt ca. 2 Stunden an Zeit beanspruchte.

3.5.9 Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung

Die Datenaufzeichnung und Datenaufbereitung erfolgt gleich wie in der ersten Simulatorstudie (Kapitel 3.2.7). Hier wurden die subjektiven Müdigkeitsäußerungen der Versuchspersonen mit dem Audioaufnahmegerät aufgezeichnet sowie zusätzlich vom Versuchsleiter notiert. Ebenso wurde ein Video während der gesamten Fahrt von der Versuchsperson aufgenommen.

Die Aufzeichnung der Blickdaten erfolgte mit dem Programm „Recorder“ (Ergoneers GmbH, 2010c), die folgende Nachbearbeitung der Blickdaten mit dem Programm „Analysis“ (Ergoneers GmbH, 2010a). Die Markerdetektion wurde mit dem Programm „Markerdetektor“ (Ergoneers GmbH, 2010b) durchgeführt. Des Weiteren wurden die Blickdaten zusätzlich noch mit dem Programm „Diadem“ (National Instruments, 2011) in 10-Minutenabschnitte unterteilt und den entsprechenden Müdigkeitsabschnitten zugeordnet.

Für die Aufbereitung der Sprachdaten wurde das Programm Diadem verwendet. Mit dem Programm wurde die zeitliche Dauer der einzelnen Müdigkeitsäußerungen vermessen und dem entsprechenden 10-Minutenabschnitt zugeordnet. Bevor die Sprachdaten den entsprechenden 10-Minutenabschnitten zugeteilt wurden, wurden Differenzmaße berechnet. Hierfür wurde die Äußerung zum jeweiligen Zeitpunkt (z.B. Zeitpunkt 1:00 Stunden) von der gleichen Äußerung aus der Baselineaufzeichnung abgezogen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die Personen unterschiedliche Äußerungen tätigen konnten (z.B. wach 0, sehr müde plus, usw.). Wenn hier keine Differenzmaße gebildet worden wären, hätte eine Auswertung nicht sinnvoll erfolgen können.

3.6 Zusammenfassender Überblick über die vier Studien

Bis jetzt wurden sämtliche Methoden der vier Studien vorgestellt. Für einen besseren Überblick sollen relevante Aspekte der Studien zusammenfassend betrachtet werden. Des Weiteren soll aufgezeigt werden, wie viele Daten (10-Minutenabschnitte) pro Studie generiert werden konnten und welche Müdigkeitsausprägungen wie häufig vorkamen. Die hier berichtete Anzahl an 10-Minutenabschnitten soll nur als Anhaltspunkt dienen und beinhaltet noch keine messtechnischen Einschränkungen.

Tabelle 10: Aspekte der vier Studien sowie Anzahl an Versuchspersonen und 10-Minutenabschnitten.

| Studie | Straßentyp | | Verkehrsumgebung | | 10 Min gesamt | | | Müdigkeitsstufe* | | | VPs |
|----------|------------|----|------------------|-----|---------------|------|----------|------------------|------|-----|-----|
| | LS | AB | Real | Sim | LS | AB | Σ | Grün | Gelb | Rot | |
| 1 | ✓ | ✓ | | ✓ | 169 | 162 | 331 | 60 | 194 | 77 | 28 |
| 2 | ✓ | ✓ | ✓ | | 254 | 233 | 487 | 24 | 215 | 26 | 27 |
| 3 | | ✓ | ✓ | | | 476 | 476 | 83 | 243 | 150 | 25 |
| 4 | | ✓ | | ✓ | | 412 | 412 | 106 | 150 | 156 | 32 |
| Σ | | | | | 423 | 1283 | 1706 | 273 | 802 | 409 | 112 |

Anmerkung: LS = Landstraße; AB = Autobahn; Real = reale Verkehrsumgebung; Sim = Simulator; VP = Versuchspersonenanzahl; 10 Min = Anzahl 10 Minutenabschnitte; * = Müdigkeitswerte zu denen Fahrdaten vorhanden sind.

Wie aus Tabelle 10 ersichtlich, wurden in Studie 1 und 2 sowohl Autobahnen als auch Landstraßen untersucht. Dabei wurde Studie 1 im Simulator und Studie 2 in einer realen Verkehrsumgebung durchgeführt.

Wie man sehen kann, wurden in der realen Verkehrsumgebung, bedingt durch die längere Fahrtzeit, mehr 10-Minutenabschnitte erhoben.

Betrachtet man die Verteilung der Müdigkeitsstufen, so zeigt sich, dass sowohl im Simulator als auch in der Realfahrt die meisten Fahrer in der gelben Müdigkeitsstufe vorzufinden sind. In der Simulation finden sich zudem fast dreimal so viele Fahrer in der roten Müdigkeitsstufe im Vergleich zur Realfahrt.

Studie 3 und 4 fanden beide auf einer Autobahn statt, einmal im Realverkehr (Studie 3), einmal im Simulator (Studie 4). Die Anzahl an 10-Minutenabschnitten ist zwischen den beiden Studien annähernd gleich. Auch hier zeigt sich eine Häufung in der gelben Müdigkeitsstufe, es liegen jedoch auch für die rote Müdigkeitsstufe relativ viele Messepochen vor.

Diese Darstellung soll lediglich dazu dienen, einen besseren Einblick darüber zu bekommen, wie sich die Müdigkeitsstufen über die einzelnen Studien hinweg verteilen. Zudem ist auch gut ersichtlich, dass in den beiden Studien mit einem Landstraßenabschnitt im Verhältnis zu den reinen Autobahnfahrten relativ wenige Fahrer als sehr müde bewertet wurden.

4. ERGEBNISSE

Nachdem die Methoden und ein Überblick über relevante Aspekte der Studien dargelegt wurden, erfolgt im nächsten Schritt die Präsentation der Ergebnisse. Diese gliedert sich in sieben Teilabschnitte.

1. Darstellung der erfassten Müdigkeitsstufen und des Müdigkeitsverlaufs

Müdigkeit kann nicht systematisch variiert werden. Daher muss zunächst geprüft werden, ob durch den Versuchsaufbau unterschiedliche Müdigkeitszustände bei den Fahrern induziert werden konnten. Dies wird im ersten Abschnitt der Ergebnisse und in allen vier Studien in gleicher Weise dargestellt.

2. Überprüfung des Müdigkeitsreferenzierungssystems

In diesem Abschnitt wird das neuentwickelte Müdigkeitsreferenzierungssystem hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen der Selbst- und Fremdreferenzierung überprüft. Hierdurch können Aussagen über die Güte des Messverfahrens gewonnen werden.

3. Gemeinsame Analyse der vier Studien mit Müdigkeit als Innersubjektfaktor

Wie bereits beschrieben werden die vier Studien nicht getrennt analysiert. Stattdessen werden aus jeder Studie jene Personen extrahiert, die Müdigkeitswerte in allen drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) aufwiesen. Um eine Auswertung nach dem Innersubjektdesign zu ermöglichen, wurden, sofern von einer Person mehrere Müdigkeitswerte (z.B. 1, 3, 4) pro Müdigkeitsstufe (z.B. grün) vorlagen, diese Werte gemittelt (z.B. $1+3+4 = 8/3 = 2.6$) und gingen dann mit diesem Wert in die Analyse ein. So können, unabhängig vom Messzeitpunkt, identische Müdigkeitsausprägungen einer Person zu einer übergeordneten Stufe zusammengefasst werden. Zusätzlich kann man die Veränderung unter Müdigkeit im Vergleich zu einem individuell wachen Wert herstellen.

Durch dieses Vorgehen ergeben sich sehr gut interpretierbare Werte die einen „Ground truth“ der Müdigkeitsauswirkungen darstellen. Nachteilig dabei ist, dass man dadurch die vorhandene Datenmenge künstlich reduziert. Um sämtliche Daten zu nutzen, wurden diesen in einer weiteren Analyse nochmals auf Einzelebene analysiert.

4. Gemeinsame Analyse der vier Studien mit Müdigkeit als Zwischensubjektfaktor

In dieser Analyse wird Müdigkeit als Zwischensubjektfaktor betrachtet. Dadurch wird es im Vergleich mit der vorherigen Analyse möglich, zu prüfen, inwiefern Müdigkeitsauswirkungen personenabhängig sind oder nicht. Hierfür wurden die Daten umstrukturiert und jeder Müdigkeitswert als Zwischensubjektwert in die Analysen aufgenommen. Hier werden die Daten also so behandelt, als ob diese

jeweils von unterschiedlichen Personen stammen. Dadurch vermischt sich demnach die intra- mit der interindividuellen Varianz der Fahrer bezüglich des Fahrverhaltens und man erhöht künstlich die Anzahl der Versuchspersonen, da jeder Fahrer 12- bis 13-mal in die Analyse eingeht. Diesen Aspekt gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Problematisch dabei ist, dass bestimmte Probanden vor allem wach, andere mittel müde, wieder andere stark müde sind. Man vergleicht also drei unterschiedliche Gruppen. Auf der einen Seite ist das sinnvoll, da es die Zwischensubjektbetrachtung unterstützt. Auf der anderen Seite wurden die Personen den Gruppen nicht per Zufall zugewiesen. Man weiß also nicht, ob die Unterschiede tatsächlich auf Müdigkeit zurückzuführen sind oder andere Einflüsse wirksam werden. Dieses Vorgehen kommt jedoch der in der Realität vorliegenden Gegebenheiten sehr nahe. Auch dort ist im Allgemeinen nicht bekannt, welcher Fahrer das Fahrzeug lenkt und in welchem Müdigkeitszustand sich dieser zu Beginn der Fahrt befindet. Des Weiteren muss ein derartiges System in der Lage sein, die Müdigkeit eines Fahrers zu erkennen, auch wenn dieser z.B. nur 10 Minuten mit dem Fahrzeug unterwegs ist. Durch dieses Vorgehen ist es demnach möglich, einen Vergleich zwischen den beiden Berechnungsmethoden durchzuführen und eventuelle Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede in den Müdigkeitsauswirkungen zu entdecken.

Durch diese Analysen ist jedoch nur möglich, eventuell vorhandene Unterschiede zwischen den einzelnen Müdigkeitsstufen zu identifizieren. Für die Aussage darüber, wie gut eine mögliche Müdigkeitsdetektion anhand dieser Daten möglich ist, müssen weitere Berechnungen durchgeführt werden.

5. Müdigkeitsdetektion

Im fünften Auswertungsschritt wurde auf Grundlage der Daten der Personen aus den abhängigen Analysen ein Modell für eine Müdigkeitsdetektion erstellt. Somit wurden für die Modellerstellung jene Fahrer verwendet, von denen Müdigkeitswerte in allen drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) vorlagen.

Dieses erstellte Modell wurde dann in einem weiteren Auswertungsschritt auf sämtliche Fahrer angewandt, unabhängig davon, in wie vielen Müdigkeitsstufen diese Fahrer vertreten waren. Hierbei galt es zu prüfen, inwiefern eine Müdigkeitsdetektion anhand des erstellten Modells erfolgen kann, was es möglich macht, eine Aussage über die Qualität des Modells zu erhalten.

6. Müdigkeitsdetektion mit Baseline

Im sechsten Auswertungsschritt dieser Arbeit wurde eine individuelle Baseline für die Fahrdaten eingeführt. Der Grund dafür war, dass das erste Modell zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen geführt hat. Die Baseline wurde gebildet, indem die wachen Müdigkeitswerte von Fahrern, bei denen Müdigkeitswerte in allen drei Müdigkeitsstufen vorlagen, von allen anderen Müdigkeitsstufen abgezogen. Mit der dadurch entstandenen Datenbasis wurde ein Modell zur Müdigkeitsdetektion erstellt. Zur Prüfung dieses Modells wurden wieder sämtliche Daten der Fah-

rer herangezogen, unabhängig davon, ob sämtliche Müdigkeitsstufen besetzt waren.

7. Müdigkeitsunterschiede und Müdigkeitsdetektion anhand von Verhaltensdaten zusätzlich zu den Fahrdaten

Auch das Modell auf Basis einer Baseline brachte noch kein zufriedenstellendes Ergebnis in der Müdigkeitsdetektion. Aus diesem Grund wurden in einem letzten Auswertungsschritt zusätzlich zu den Fahrdaten noch Blick- und Sprachdaten analysiert. Hierfür wurden zuerst Unterschiede in den Daten in Abhängigkeit der jeweiligen Müdigkeitsstufe identifiziert. In einem weiteren Schritt wurde mit den zusätzlichen Daten gemeinsam mit den Fahrdaten eine Müdigkeitsdetektion durchgeführt. Hierdurch war es möglich, einen vorhandenen Mehrwert für eine Müdigkeitsdetektion aufzuzeigen.

Im nachfolgenden Teil werden die besprochenen Punkte ausführlich dargestellt und diskutiert.

4.1 Erfasste Müdigkeitsstufen und Müdigkeitsverlauf

4.1.1 Studie 1

4.1.1.1 Müdigkeitsstufen

Vor der Ergebnisanalyse wurde kontrolliert, ob eine Müdigkeitsinduktion durch den Versuchsaufbau bzw. durch die gewählte Versuchsstrecke, stattgefunden hat. Bevor die hierfür notwendigen Analysen berechnet wurden, wird zuerst ein Überblick über die Verteilung der jeweiligen Müdigkeitswerte über die 10-Minutenabschnitte sowie über die einzelnen Versuchspersonen gegeben (Tabelle 11 & Tabelle 12).

Tabelle 11: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt.

| | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|---|---|---|----|----|----|---|---|----|----|----|----|
| Zeit [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 0:10 | | | 3 | 5 | 14 | 4 | 2 | | | | | | |
| 0:20 | | | 3 | 4 | 8 | 11 | 1 | 1 | | | | | |
| 0:30 | | | 2 | 2 | 10 | 8 | 4 | 2 | | | | | |
| 0:40 | | | 1 | 2 | 8 | 7 | 5 | 4 | 1 | | | | |
| 0:50 | | | | 3 | 5 | 8 | 4 | 4 | 3 | | 1 | | |
| 1:00 | | | | 2 | 5 | 11 | 3 | 4 | 2 | | 1 | | |
| 1:10 | | | | 2 | 2 | 10 | 6 | 4 | 2 | 1 | 1 | | |
| 1:20 | | | 1 | | 4 | 6 | 7 | 6 | 2 | 2 | | | |
| 1:30 | | | | 1 | 2 | 5 | 10 | 4 | 2 | 3 | 1 | | |
| 1:40 | | | 1 | | 3 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | | |
| 1:50 | | | 1 | | 3 | 5 | 4 | 7 | 1 | 5 | 2 | | |
| 2:00 | | | | 1 | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | |
| 2:10 | | | | | | | 2 | 2 | 1 | | 1 | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, zeigt sich über die Messzeitpunkte hinweg, dass sich ein Großteil der Müdigkeitswerte im Bereich zwischen 3 und 11 befindet. Des Weiteren zeigt sich, dass es keine einzige Person gegeben hat, die am Beginn der Untersuchung als wach (Wert 1) beurteilt wurde. Ebenso wurde keine Person als gänzlich müde (Wert 13) beurteilt. Man erkennt auch mit der Zeit eine Verlagerung der Werte in den Bereich gelb und rot, d.h. eine zunehmende Müdigkeit mit der Versuchszeit.

Tabelle 12: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson.

| Versuchsperson | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 01 | | | | | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | | | | |
| 02 | | | | | 5 | 3 | 2 | 2 | | | | | |
| 03 | | | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 04 | | | | | 1 | 3 | 5 | 4 | | | | | |
| 05 | | | | | 1 | 3 | 6 | | 3 | | | | |
| 06 | | | | | 1 | 2 | 5 | 3 | | 1 | 1 | | |
| 07 | | | 1 | | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | |
| 08 | | | | | | | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | | |
| 09 | | | | | | | 2 | 6 | 2 | 1 | 1 | | |
| 10 | | | | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | | |
| 11 | | | | 1 | 3 | 3 | 3 | | 1 | | | | |
| 12 | | | | | 5 | 6 | | | | | | | |
| 13 | | | | 3 | 4 | 3 | 2 | | | | | | |
| 14 | | | | | 1 | 2 | 3 | 2 | | 2 | 1 | | |
| 15 | | | | | | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | | |
| 16 | | | | | 5 | 5 | 2 | | | | | | |
| 17 | | | | | 4 | 5 | 2 | | | | | | |
| 18 | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | | | 1 | |
| 19 | | | 3 | 8 | 1 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | 7 | 4 | | | | | | | |
| 21 | | | | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | | | | | |
| 22 | | | | 1 | 3 | 6 | 1 | | | | | | |
| 23 | | | 4 | 3 | 3 | | | 1 | | | | | |
| 24 | | | | | 2 | 8 | 1 | | | | | | |
| 25 | | | | | | 7 | 2 | 2 | | | | | |
| 26 | | | | | 1 | 2 | 4 | 5 | | | | | |
| 27 | | | | | 1 | 1 | | 2 | 1 | 3 | 5 | | |
| 28 | | | | 2 | 5 | 4 | 1 | | | | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Betrachtet man die Verteilung der Müdigkeitswerte über die Versuchspersonen (Tabelle 12) so zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier finden sich in den mittleren Müdigkeitsstufen die meisten Müdigkeitswerte.

Diese deskriptive Betrachtung der Müdigkeitswerte lässt allerdings noch keinen Schluss darüber zu, ob es zu einer signifikanten Veränderung bzw. Anstieg der Müdigkeit im Laufe des Versuches gekommen ist. Hierfür war es notwendig mehrere Zeitpunkte zu betrachten. Dieses Vorgehen wird nachfolgend beschrieben.

Auf Grund der Länge der Fahrstrecke (238 km) und der vorgegebenen Geschwindigkeit waren die Fahrer ca. 2 Stunden unterwegs. Daraus ergaben sich bei 10-minütigen Abschnitten somit 11 bis 13 10-Minutenabschnitte bzw. Epochen. Da

die Anzahl der Epochen mit der individuellen Fahrgeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsvarianz der einzelnen Versuchspersonen zusammenhängt, wurden für die Analyse des Müdigkeitsverlaufes die Zeiten

- 0:00 (0:10 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 0:30 (0:30 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 1:00 (1:00 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 1:30 (1:30 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 1:50 (1:50 Stunden nach Fahrtbeginn)

herangezogen. Als letzter Messzeitpunkt wurde die Zeit 1:50 Stunden verwendet, da sich zu diesem Zeitpunkt noch 27 Versuchspersonen im Vergleich zu Zeit 2:10 Stunden mit nur noch 4 Versuchspersonen auf der Versuchsstrecke befanden.

4.1.1.2 Müdigkeitsverlauf

Die Analysen des Müdigkeitsverlaufes erfolgten für die Fremd- als auch für die Selbstbewertung der Müdigkeit. Hierfür wurde eine 2-faktorielle (2 Selbstbewertung und Fremdbewertung x 5 Zeitpunkte) Varianzanalyse mit Messwiederholung auf beiden Faktoren berechnet.

Betrachtet man die Ergebnisse für die Selbst- und Fremdbewertung der Müdigkeit (Abbildung 25) über die fünf verschiedenen Zeitpunkte, so zeigt sich eine signifikante Veränderung der Müdigkeit über die Zeit ($F_{(4/104)} = 22.81$; $p = .000$; $\eta^2 = .467$). Die paarweisen Vergleiche zeigen einen signifikanten Anstieg der Müdigkeit von jedem Zeitpunkt zum Nachfolgendem, außer zwischen den Zeitpunkten 1:00 bis 1:30 und 1:30 bis 1:50. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bewertungsverfahren können keine gefunden werden ($F_{(1/26)} = .57$; $p = .456$; $\eta^2 = .022$) ebenso keine signifikanten Wechselwirkungen ($F_{(4/104)} = 1.91$; $p = .114$; $\eta^2 = .068$).

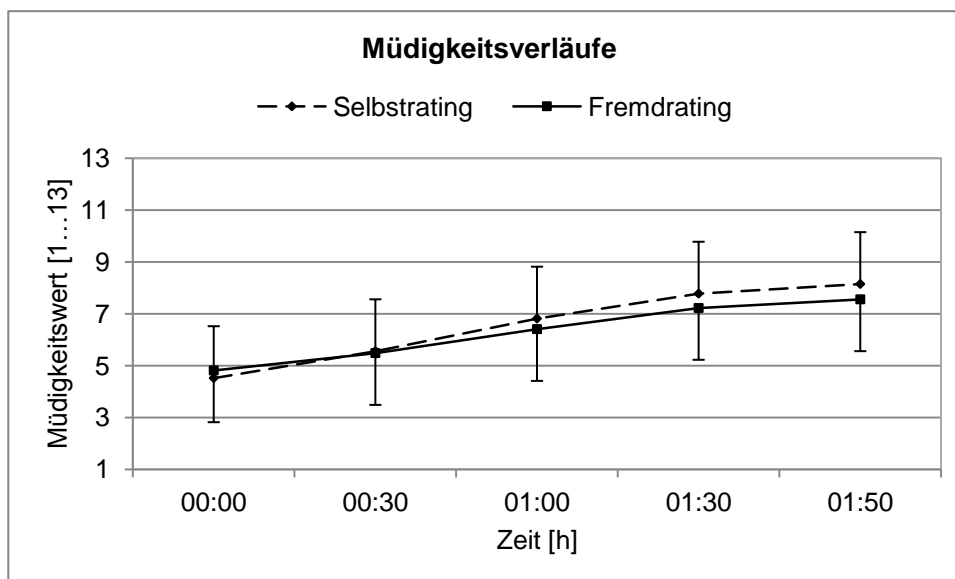


Abbildung 25: Mittlere Müdigkeitswerte für Fremd- und Selbstbewertung.

Insgesamt zeigt sich, dass die Fahrer durch den gewählten Versuchsaufbau im Laufe der Fahrt müder wurden. Gegen Ende des Versuchs findet nur mehr eine ge-

ringe Veränderung der Müdigkeit statt, da bereits ein hoher Müdigkeitsgrad erreicht ist. Zudem kann kein signifikanter Unterschied in der Höhe der Müdigkeitsurteile zwischen beiden Bewertungsverfahren gefunden werden.

4.1.2 Studie 2

4.1.2.1 Müdigkeitsstufen

Analog zu Studie 1 wird ein Überblick über die Verteilung der Müdigkeitswerte der einzelnen Zeitpunkte sowie der Versuchspersonen gegeben (Tabelle 13 & Tabelle 14).

Tabelle 13: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt.

| Zeit [h] | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|----|----|----|---|----|----|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 0:00 | 8 | 16 | 3 | | | | | | | | | | |
| 0:10 | 1 | 16 | 9 | 1 | | | | | | | | | |
| 0:20 | | 8 | 14 | 4 | 1 | | | | | | | | |
| 0:30 | | 6 | 12 | 8 | 1 | | | | | | | | |
| 0:40 | | 3 | 11 | 11 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 0:50 | | 1 | 11 | 11 | 2 | 1 | 1 | | | | | | |
| 1:00 | | 1 | 8 | 14 | 2 | 1 | 1 | | | | | | |
| 1:10 | | 1 | 7 | 9 | 6 | 3 | 1 | | | | | | |
| 1:20 | | 1 | 5 | 7 | 8 | 5 | | 1 | | | | | |
| 1:30 | | | 3 | 10 | 7 | 6 | 1 | | | | | | |
| 1:40 | | | 2 | 8 | 5 | 9 | 3 | | | | | | |
| 1:50 | | | 1 | 9 | 7 | 5 | 2 | 3 | | | | | |
| 2:00 | | 1 | | 5 | 7 | 7 | 3 | 4 | | | | | |
| 2:10 | | | 1 | 3 | 8 | 5 | 7 | 2 | 1 | | | | |
| 2:20 | | | 1 | 1 | 9 | 5 | 8 | 3 | | | | | |
| 2:30 | | | 1 | | 5 | 9 | 10 | | 2 | | | | |
| 2:40 | | | 1 | | 7 | 5 | 11 | 1 | 2 | | | | |
| 2:50 | | | 1 | | 2 | 10 | 9 | 3 | 2 | | | | |
| 3:00 | | | | 1 | 2 | 10 | 9 | 2 | 1 | | | | |
| 3:10 | | | | 1 | | 7 | 3 | 1 | 2 | | | | |
| 3:20 | | | | | 1 | 2 | 1 | | | | | | |
| 3:30 | | | | 1 | | | 1 | | | | | | |
| 3:40 | | | | | | | 1 | | | | | | |
| 3:50 | | | | | | | 1 | | | | | | |
| 4:00 | | | | | | 1 | | | | | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Wie sich in Tabelle 13 zeigt, gibt es am Anfang der Untersuchung einige Personen die als wach beurteilt werden. Als sehr stark müde (Müdigkeitswert > 10) wird

ebenfalls kein Fahrer beurteilt. Trotz längerer Fahrdauer (ca. 3:20 Stunden) werden die Personen nicht so müde klassifiziert wie in Studie 1.

Tabelle 14: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson.

| Versuchsperson | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---|---|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | | 4 | 6 | 3 | 1 | | | | |
| 2 | | 1 | 1 | 5 | 1 | 3 | 1 | 3 | 4 | | | | |
| 3 | | 4 | 5 | 5 | 1 | 5 | | | | | | | |
| 4 | | 3 | 2 | 2 | 6 | 7 | | | | | | | |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 3 | | 7 | 6 | | | | | | |
| 6 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 | | | | | |
| 7 | 1 | 1 | 5 | 2 | 3 | 9 | | | | | | | |
| 8 | | 5 | 6 | 4 | 2 | 3 | | | | | | | |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4 | 1 | 4 | 5 | | | | |
| 10 | | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 5 | | | | | | |
| 11 | | 1 | 2 | 5 | 2 | 1 | 5 | 3 | | | | | |
| 12 | 2 | 8 | 8 | 3 | 1 | | | | | | | | |
| 13 | | 1 | 1 | 5 | 5 | 1 | 7 | | | | | | |
| 14 | | 1 | 4 | 3 | 1 | 4 | 6 | 1 | | | | | |
| 15 | | 1 | 1 | 10 | 4 | 2 | 1 | | | | | | |
| 16 | | | 1 | 1 | 2 | 3 | 9 | 4 | | | | | |
| 17 | | 1 | 5 | 6 | 4 | 3 | | | | | | | |
| 18 | | | 3 | 4 | 3 | 3 | 6 | | | | | | |
| 19 | | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 2 | | | | | | |
| 20 | | | 2 | 2 | 4 | 4 | 7 | | | | | | |
| 21 | | 2 | 7 | 4 | 5 | 2 | | | | | | | |
| 22 | | 2 | 4 | 4 | 7 | 2 | | | | | | | |
| 23 | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | | | | | | | |
| 24 | | 4 | 6 | 2 | 6 | 1 | | | | | | | |
| 25 | | 4 | 4 | 6 | 3 | 2 | | | | | | | |
| 26 | | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 1 | | | | | |
| 27 | 1 | 1 | 6 | 5 | 4 | 5 | 3 | | | | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Auch für die Verteilung der Müdigkeitswerte auf Personenebene (Tabelle 14) zeigt sich, dass es keine sehr stark müden Fahrer gibt. Wie auch in Studie 1 finden sich die meisten Müdigkeitswerte im Bereich der unteren bis mittleren Müdigkeit (Werte 3 – 6), wohingegen starke und sehr starke Müdigkeit kaum vorliegt (Werte 8 – 13).

Auch hier wird statistisch geprüft, ob es zu einer signifikanten Müdigkeitsveränderung im Laufe der Untersuchung kommt. Aus der Fahrzeit von ca. 3 bis 4 Stunden ergeben sich bei 10-minütigen Intervallen 18 bis 24 Zeitabschnitte. Da die Anzahl der Abschnitte mit der Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Versuchspersonen sowie den

gegebenen Verkehrsbedingungen zusammenhängt, werden für diese Analyse die Zeiten

- 0:00 (Müdigkeitswert zu Beginn der Fahrt)
- 0:40 (0:40 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 1:30 (1:30 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 2:20 (2:20 Stunden nach Fahrtbeginn)
- 3:00 (3:00 Stunden nach Fahrtbeginn)

herangezogen. Diese unterschiedliche Einteilung der betrachteten Zeitabschnitte im Vergleich zu Studie 1 ergibt sich aufgrund der längeren Versuchsdauer. Die letzte betrachtete Epoche wurde nach 3 Stunden Fahrt ausgewählt, da sich dort noch nahezu alle Versuchspersonen (25 von 27) auf der Versuchsstrecke befanden. Nach einer Fahrzeit von 3:10 Stunden waren noch 14, nach 3:20 nur noch 4 Personen unterwegs.

4.1.2.2 Müdigkeitsverlauf

Die Analyse des Müdigkeitsverlaufes erfolgt für die Fremd- als auch für die Selbstbewertung der Müdigkeit. Hierfür wird eine 2x5 (2 Selbstbewertung und Fremdbewertung x 5 Zeitpunkte) Varianzanalyse mit Messwiederholung auf beiden Faktoren berechnet.

Die Ergebnisse für die Selbst- und Fremdbewertung der Müdigkeit (Abbildung 26) über die fünf verschiedenen Zeitpunkte hinweg zeigen eine signifikante Veränderung der Müdigkeit über die Zeit ($F_{(2.18/52.39)} = 257.08$; $p = .000$; $\eta^2 = .859$). Es gibt einen signifikanten Anstieg der Müdigkeit von jedem Zeitpunkt zum Nachfolgendem, außer zwischen den letzten beiden Zeitpunkten. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bewertungsverfahren können nur tendenziell gefunden werden ($F_{(1/24)} = 3.11$; $p = .091$; $\eta^2 = .115$). Es zeigt sich allerdings eine signifikante Interaktion ($F_{(2.13/51.11)} = 4.08$; $p = .004$; $\eta^2 = .145$). Die beiden Bewertungsverfahren unterscheiden sich zu Zeitpunkt 0:00 signifikant, wobei das Selbstrating höher ausfällt als das Fremdrating. Zudem zeigt sich, dass für das Fremdrating keine signifikante Veränderung der Müdigkeit zwischen den letzten beiden Zeitpunkten zu finden ist. Für das Selbstrating fand sich zu diesen Zeitpunkten noch ein tendenzieller Anstieg der Müdigkeit.

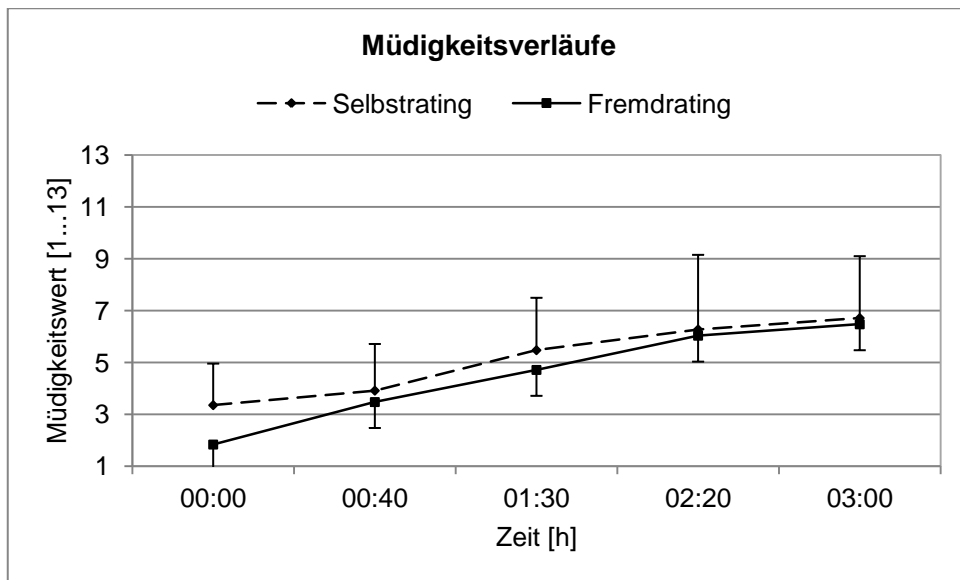


Abbildung 26: Mittlere Müdigkeitswerte für Fremd- und Selbstbewertung.

Insgesamt zeigt sich, dass während des Versuches ein Anstieg der Müdigkeit bei den Teilnehmern festgestellt werden kann. Die geringeren Müdigkeitswerte in der Realfahrtstudie könnten sich dadurch erklären lassen, dass die Personen in dieser ihre Müdigkeitsanzeichen stärker kontrollieren und dadurch für die Fremdbewertung nicht so gut beobachtbar sind wie in der Simulatorfahrt (Studie 1).

4.1.3 Studie 3

4.1.3.1 Müdigkeitsstufen

Analog zu den beiden Studien zuvor wird zuerst ein Überblick über die Verteilung der Müdigkeitswerte über die einzelnen Zeitpunkte sowie die Versuchspersonen gegeben (Tabelle 15 & Tabelle 16).

Tabelle 15: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt.

| | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|----|----|---|---|----|---|---|---|----|----|----|----|
| Zeit [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 00:00 | | 16 | 7 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 00:10 | | 4 | 10 | 3 | 3 | 4 | 1 | | | | | | |
| 00:20 | | 2 | 4 | 8 | 4 | 5 | 2 | | | | | | |
| 00:30 | | 1 | 2 | 7 | 8 | 4 | 1 | 2 | | | | | |
| 00:40 | | 1 | 2 | 5 | 7 | 6 | 2 | 2 | | | | | |
| 00:50 | | 1 | | 6 | 6 | 8 | 1 | 2 | | | 1 | | |
| 01:00 | | 1 | 1 | 4 | 9 | 2 | 6 | | 1 | | 1 | | |
| 01:10 | | 1 | 1 | 2 | 5 | 7 | 7 | | 1 | | 1 | | |
| 01:20 | | | 2 | 1 | 3 | 10 | 6 | 1 | 1 | 1 | | | |
| 01:30 | | 1 | 1 | | 5 | 4 | 9 | 4 | | 1 | | | |
| 01:40 | | | 2 | | 3 | 7 | 8 | 4 | 1 | | | | |
| 01:50 | | | 1 | 2 | 1 | 6 | 7 | 5 | 2 | | 1 | | |
| 02:00 | | | 1 | 1 | 2 | 6 | 4 | 7 | 2 | 2 | | | |
| 02:10 | | | 2 | | 1 | 5 | 7 | 5 | 3 | 1 | 1 | | |
| 02:20 | | | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 8 | 3 | 1 | 1 | | |
| 02:30 | | | 1 | 1 | | 2 | 7 | 9 | 2 | 1 | 2 | | |
| 02:40 | | | 1 | 1 | 1 | 2 | 7 | 4 | 6 | 2 | 1 | | |
| 02:50 | | | 1 | 1 | 1 | | 7 | 5 | 3 | 5 | 1 | | |
| 03:00 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 6 | 3 | 6 | | | |
| 03:10 | | | 1 | 2 | | 3 | 3 | 8 | 1 | 3 | | | |
| 03:20 | | | 1 | | 1 | 2 | 1 | 5 | 1 | 2 | | | |
| 03:30 | | | | | 2 | 1 | 1 | 2 | | 2 | | | |
| 03:40 | | | | | | | 1 | | | 1 | | | |
| 03:50 | | | | | | | | | | 1 | | | |
| 04:00 | | | | | | | | | | 1 | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Wie aus Tabelle 15 ersichtlich, gibt es in keinem Zeitabschnitt Fahrer die als völlig wach (Wert 1) beurteilt werden. Wie auch in der vorangegangenen Realfahrtstudie befinden sich die meisten Müdigkeitsbewertungen im Bereich der mittleren bis starken Müdigkeit. Insgesamt sind der sehr starken Müdigkeit (Wert 10 bis 13) 10 Müdigkeitswerte zuzuordnen, wobei die erste Nennung bereits nach 50 Minuten zu finden ist. In Tabelle 16 sind die Müdigkeitswerte pro Versuchsperson dargestellt.

Tabelle 16: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson.

| Versuchsperson | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | | | 1 | | 1 | 5 | 8 | 6 | | | | | |
| 2 | | 1 | 1 | 3 | 3 | 7 | 6 | 2 | | | | | |
| 3 | | | 1 | | 2 | 8 | 1 | 7 | 1 | | | | |
| 4 | | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | | | | | |
| 5 | | 1 | | | | 5 | 4 | 8 | 3 | | | | |
| 6 | | 2 | 3 | 5 | 9 | 3 | | | | | | | |
| 7 | | 9 | 12 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | 1 | | 2 | 3 | 4 | 6 | 4 | | |
| 9 | | 1 | 10 | 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | 1 | | | 2 | 5 | 6 | 6 | | | | |
| 11 | | | 1 | | 1 | 7 | 9 | 4 | | | | | |
| 12 | | 2 | | 7 | 6 | 4 | 1 | | | | | | |
| 13 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | | |
| 14 | | 1 | | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 | | | |
| 15 | | | 1 | | 2 | 4 | 8 | 5 | | | | | |
| 16 | | | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | | | | |
| 17 | | 1 | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 | 1 | 2 | | | |
| 18 | | 3 | | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 7 | | | |
| 19 | | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | | | | | |
| 20 | | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | | | | | |
| 21 | | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | 4 | 3 | 3 | | | | |
| 22 | | 1 | 1 | 1 | 4 | 9 | 6 | | | | | | |
| 23 | | | | 1 | | 1 | 2 | 4 | 5 | 9 | 3 | | |
| 24 | | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 2 | 7 | | | | | |
| 25 | | | 1 | 1 | 5 | 4 | 9 | 1 | | | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Da dies hier nur eine deskriptive Darstellung ist, wurden zur genaueren Betrachtung bezüglich des Müdigkeitsverlaufes statistische Verfahren durchgeführt.

Es werden wieder fünf Zeitabschnitte für die Berechnungen herangezogen, wobei der letztbetrachtete Zeitpunkt bei 3:00 Stunden liegt. Dieser Zeitpunkt wurde, wie schon zuvor, aus dem Grund gewählt, da sich dort noch nahezu alle Versuchspersonen (24 von 25) auf der Teststrecke befanden. In den darauffolgenden Zeitabschnitten verringerte sich die Versuchspersonenzahl sehr rasch. Nach 3:10 Stunden waren es noch 21 Personen nach 3:20 Stunden nur noch 13 Teilnehmer die auf der Versuchsstrecke unterwegs waren.

Für die folgenden varianzanalytischen Berechnungen werden daher wieder die gleichen Zeitabschnitte verwendet wie in Studie 2.

4.1.3.2 Müdigkeitsverlauf

Die Analyse des Müdigkeitsverlaufes erfolgt für die Fremd- als auch für die Selbstbewertung der Müdigkeit. Hierfür wird eine 2-faktorielle (2 Selbstbewertung

und Fremdbewertung x 5 Zeitpunkte) Varianzanalyse mit Messwiederholung auf beiden Faktoren berechnet.

Betrachtet man die Ergebnisse für die Selbst- und Fremdbewertung der Müdigkeit (Abbildung 27) über die fünf verschiedenen Zeitpunkte hinweg, so zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Müdigkeit über die Zeit ($F_{(1.94/44.72)} = 84.07$; $p = .000$; $\eta^2 = .785$). Es gibt einen signifikanten Anstieg der Müdigkeit von jedem Zeitpunkt zum Nachfolgenden, außer zwischen den letzten beiden Zeitpunkten. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bewertungsverfahren können ebenfalls gefunden werden ($F_{(1/23)} = 7.67$; $p = .011$; $\eta^2 = .250$), wobei die Selbstbewertung geringer ausfällt als die Fremdbewertung. Zudem ergibt sich eine signifikante Interaktion ($F_{(2.79/64.33)} = 14.44$; $p = .000$; $\eta^2 = .386$). Die beiden Bewertungsverfahren unterscheiden sich signifikant zu den Zeitpunkten 0:40, 1:30, 2:20 und 3:00, wobei die Fremdbewertung höher ausfällt als die Selbstbewertung. Zudem zeigt sich keine signifikante Erhöhung der Müdigkeit für die Selbstbewertung zwischen den Zeitpunkten 0:00 und 0:40, 1:30 und 2:20 sowie 2:20 und 3:00. In der Fremdbewertung hingegen steigt die Müdigkeit von Zeitpunkt 2:20 zu 3:00 nur tendenziell. In den übrigen Messzeitpunkten kann für das Fremdrating ein signifikanter Anstieg der Müdigkeit festgestellt werden.

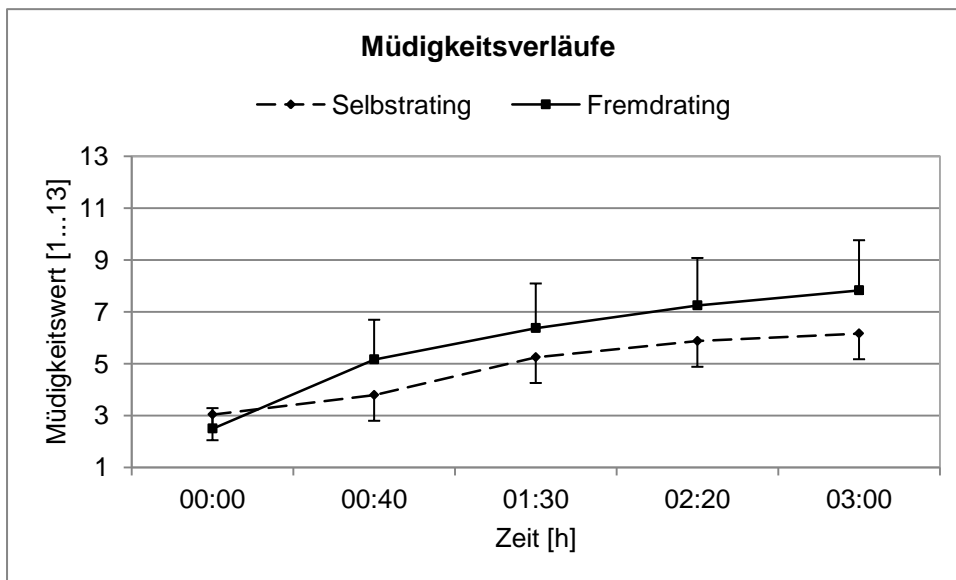


Abbildung 27: Mittlere Müdigkeitswerte für Selbst- und Fremdbewertung.

Auch in dieser Studie wurden unterschiedliche Müdigkeitszustände induziert. Zudem zeigt sich, dass sich die beiden Bewertungsverfahren hinsichtlich der Höhe des Müdigkeitswertes unterscheiden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass hier nur auf der Autobahn gefahren wurde. Im Vergleich zur Landstraße sind auf der Autobahn viel weniger Aktivitäten durch den Fahrer notwendig (z.B. Lenken, Gegenverkehr, etc.). Das könnte dazu führen, dass es dadurch den Ratern leichter möglich ist, die Müdigkeitsanzeichen der Fahrer besser zu erkennen bzw. diese vom Fahrer deutlicher gezeigt werden. Dies mündet dann in einer zuverlässigeren Bewertung.

4.1.4 Studie 4

4.1.4.1 Müdigkeitsstufen

In Studie 4 werden die Ergebnisse abweichend von den bisherigen Studien dargestellt. Dies ergibt sich dadurch, dass die Bewertung der Müdigkeit nur noch auf Grundlage der Selbstbewertung stattgefunden hat. Der Grund dafür sind die hohen Kosten für die Fremdbewertung, die in dieser Untersuchung nicht mehr finanziert werden konnten. Dies stellt zwar eine Einschränkung dar, jedoch hat sich in den vorangegangenen Studien gezeigt, dass die beiden Bewertungsverfahren einigermaßen vergleichbar sind. Teilweise konnten hinsichtlich der Höhe der Müdigkeitsbewertungen Unterschiede gefunden werden, die jedoch gering waren. Trotz dieser teilweise unterschiedlichen Ergebnisse hinsichtlich der Bewertung kann davon ausgegangen werden, dass auch die Selbstbewertung der Müdigkeit als Indikator für den tatsächlichen Müdigkeitsstatus der Person geeignet ist.

Auch hier wurde vor der Analyse der Fahrdaten kontrolliert ob die Teilnehmer durch die ausgewählte Strecke im Fahrsimulator müde wurden. Wie in den drei Studien zuvor wird zuerst ein Überblick über die Verteilung der Müdigkeitswerte über die einzelnen Zeitpunkte sowie den Versuchspersonen gegeben (Tabelle 17 & 18).

Tabelle 17: Anzahl an Müdigkeitswerten je 10-Minutenabschnitt. .

| | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| Zeit [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 0:00 | 7 | 4 | 8 | 3 | 1 | 4 | 4 | | | | | | |
| 0:10 | 3 | 8 | 4 | 5 | 2 | 5 | 3 | 2 | | | | | |
| 0:20 | 2 | 5 | 3 | 2 | 5 | 6 | 5 | 3 | 1 | | | | |
| 0:30 | 3 | 1 | 5 | 1 | 2 | 5 | 6 | 5 | 3 | 1 | | | |
| 0:40 | 2 | 2 | 5 | | 3 | 3 | 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | | |
| 0:50 | 2 | 1 | 2 | 4 | | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 | | |
| 1:00 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 2 | 8 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | |
| 1:10 | 2 | | 3 | 3 | 1 | 3 | 7 | 3 | 4 | 3 | | 3 | |
| 1:20 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 7 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 | |
| 1:30 | 2 | | 1 | 3 | 4 | 2 | 6 | 9 | | 3 | | | 2 |
| 1:40 | | 2 | 1 | | 4 | 5 | 4 | 7 | 4 | 2 | | | 2 |
| 1:50 | | | 2 | 3 | 3 | 2 | 8 | 6 | 3 | 3 | | 1 | 1 |
| 2:00 | | | 1 | 2 | 2 | | 3 | 7 | 3 | 2 | | 1 | |
| 2:10 | | | | | | | | 2 | | 1 | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Wie sich in Tabelle 17 zeigt, verteilen sich die Werte in dieser Simulatoruntersuchung relativ gleichmäßig über die gesamte Müdigkeitsskala. Interessant ist, dass es hier auch Personen gibt, die sich mit dem höchsten Müdigkeitsgrad (sehr stark plus) beschrieben haben. Dies wurde in den Untersuchungen zuvor nicht gefunden.

Tabelle 18: Anzahl an Müdigkeitswerten je Versuchsperson .

| Versuchsperson | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | | 2 | 1 | | 4 | 5 | | | | | | | |
| 2 | 5 | 2 | 6 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | 2 | 1 | 1 | | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | | | 7 | 5 | | | | | | | | | |
| 5 | | | 1 | 1 | | 1 | 9 | | | | | | |
| 6 | 1 | 1 | | | | 3 | | 3 | 4 | | | | |
| 7 | 1 | 2 | | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | | | | |
| 8 | | | 2 | | 1 | 1 | 6 | 1 | | 1 | | | |
| 9 | 1 | | | 1 | | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | | | |
| 10 | | | 2 | 1 | 2 | 1 | 5 | 2 | | | | | |
| 11 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | | | | | | | | |
| 12 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 13 | 10 | 1 | 1 | | | | | | | | | | |
| 14 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | | | | | |
| 15 | | | 2 | | | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | | | |
| 16 | | | | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | | | | |
| 17 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 | | | | | | | | |
| 18 | | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | | | | | | |
| 19 | | | | | | 1 | 4 | 2 | 4 | 1 | | | |
| 20 | | | | | | 2 | 5 | 6 | | | | | |
| 21 | | | | 1 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 22 | | | | 1 | 1 | 5 | 3 | 2 | | | | | |
| 23 | | 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 24 | | | | | | | 1 | 5 | 1 | 6 | | | |
| 25 | | | | | | 1 | | 4 | 2 | 7 | | | |
| 26 | | | | | | 3 | 5 | 6 | | | | | |
| 27 | | 3 | 2 | 5 | 3 | | | | | | | | |
| 28 | | | | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | | 2 | 2 | | |
| 29 | | | | | 1 | 2 | 1 | 4 | 3 | | 2 | | |
| 30 | | | 1 | | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | | 1 | |
| 31 | | | | | 1 | 2 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 4 | 2 |
| 32 | | | | | | 1 | 6 | 3 | 2 | 1 | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Da die Fahrt im Simulator eine Gesamtlänge von 252 km aufwies, dauerte die Fahrt bei einer Geschwindigkeitsvorgabe von 120 km ca. 2 Stunden. Durch die gleiche Untersuchungsdauer wie in Studie 1 wurden für die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Müdigkeit die gleichen Zeitabschnitte verwendet. Die letzte Zeit wurde nach 1:50 Stunden gewählt, da sich dort noch alle 32 Personen auf der simulierten Strecke befanden. Nach 2 Stunden waren hingegen nur noch 21 Personen unterwegs.

4.1.4.2 Müdigkeitsverlauf

Für die Analyse des Müdigkeitsverlaufs wird eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung für die fünf Zeitpunkte berechnet.

Betrachtet man die Müdigkeit über die fünf ausgewählten Zeitabschnitte hinweg, so zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Müdigkeit über die Zeit ($F_{(2.738/82.136)} = 36.43$; $p = .000$; $\eta^2 = .548$) (Abbildung 28).

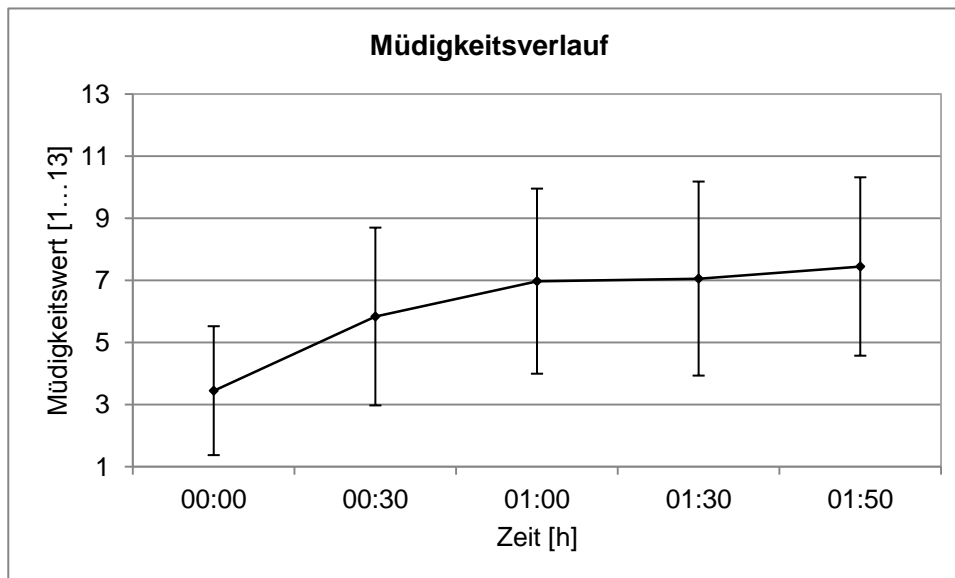


Abbildung 28: Müdigkeitsverlauf für die Selbstbewertung.

Die paarweisen Vergleiche zeigen, dass sich zwischen den Zeitpunkten 1:00 und 1:30, 1:00 und 1:50 sowie zwischen 1:30 und 1:50 keine signifikante Veränderung der Müdigkeit mehr ergibt.

Insgesamt zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Müdigkeit, der sich jedoch trotz einer monotonen Fahrumgebung nach einer Stunde nicht mehr statistisch signifikant verändert.

Da man Müdigkeit nicht systematisch variieren kann, war es notwendig zu überprüfen, ob unterschiedliche Müdigkeitszustände induziert werden konnten. Dies ist in allen Studien gelungen. Zudem wurde geprüft, ob es zwischen den beiden Referenzierungsverfahren Unterschiede in der Höhe der Müdigkeitsurteile gab. Dadurch ist es möglich, erste Aussagen darüber zu erhalten, wie gut die beiden Verfahren hinsichtlich der erfassten Müdigkeitswerte übereinstimmen. In folgendem Abschnitt wird das Müdigkeitsreferenzierungsverfahren detaillierter untersucht. Diese Analysen betrachten den Einfluss von verschiedenen Aspekten wie z.B. Verkehrsumgebung bzw. Straßentyp auf die Übereinstimmung der beiden Verfahren.

4.2 Überprüfung der subjektiven und objektiven Braunschweiger Müdigkeitsskala (SOMS)

In diesem Kapitel wird die durchgeführte Überprüfung der SOMS dargestellt. Hierbei wurden in einem ersten Schritt sämtliche Müdigkeitswerte, unabhängig von

der Fahrumgebung und der befahrenen Straße, untersucht. Nachfolgend werden dann sowohl die verschiedenen Verkehrssettings (Real, Simulation) als auch die beiden Straßentypen im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die Müdigkeitsreferenzierung betrachtet.

4.2.1 Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren über alle Studien

Wie sich bereits in den Kapiteln zuvor gezeigt hat, ist es während der einzelnen Versuche sehr gut gelungen Müdigkeit zu induzieren.

Für eine weitere Überprüfung hinsichtlich Fremd- und Selbstreferenzierung der Müdigkeit werden in einem ersten Schritt sämtliche subjektive mit den objektiven Müdigkeitswerten aller Studien korreliert. Betrachtet man diese Korrelation, so zeigt sich, dass ein höchst signifikanter Zusammenhang ($r = .556$; $p = .000$) (Abbildung 29) zwischen den beiden Bewertungsverfahren über $N = 1313$ Beobachtungseinheiten (10-Minutenintervalle) besteht.

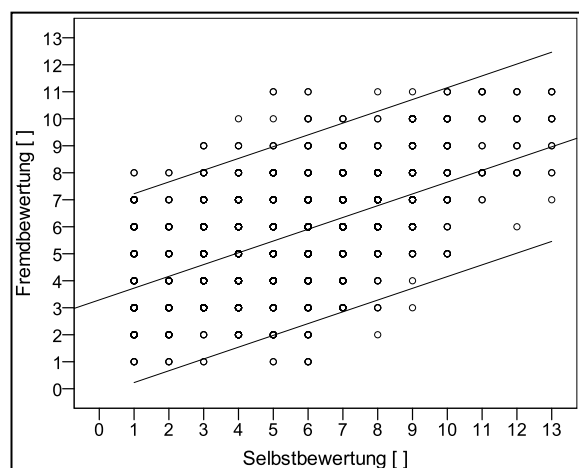


Abbildung 29: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit über alle drei Studien mit eingezeichneten Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall.

Wie sich in Abbildung 29 zeigt, besteht vorrangig in den unteren Müdigkeitsstufen eine gewisse Diskrepanz. Dies spiegelt sich auch in der Kreuztabelle aus Selbst- und Fremdreferenzierung der Müdigkeit wieder (Tabelle 19). Hier ist deutlich erkennbar, dass sich die Fahrer selbst noch als wach bezeichnen, wohingegen sie von den Ratern bereits als müde beurteilt wurden. Interessant ist hier, dass die Unterschiede in den Bewertungen teilweise über Müdigkeitsstufen hinweg zu finden sind. So beurteilen sich die Fahrer z.B. als „wach 0“ (Wert 1, Müdigkeitsstufe grün), werden aber durch die Fremdbewertung schon als „stark minus“ (Wert 8, Müdigkeitsstufe rot) beurteilt.

Tabelle 19: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte für alle drei Studien.

| | | Selbstbewertung | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|----|-----------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|------|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Σ | |
| Fremdbe- wertung | 1 | 4 | 3 | 2 | 0 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | |
| | 2 | 20 | 12 | 3 | 15 | 10 | 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 68 | |
| | 3 | 38 | 18 | 36 | 21 | 12 | 12 | 12 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 153 | |
| | 4 | 14 | 10 | 23 | 36 | 32 | 25 | 20 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 165 | |
| | 5 | 18 | 9 | 26 | 18 | 32 | 44 | 28 | 13 | 7 | 6 | 0 | 0 | 0 | 201 | |
| | 6 | 19 | 10 | 24 | 26 | 20 | 42 | 54 | 28 | 17 | 3 | 0 | 1 | 0 | 244 | |
| | 7 | 16 | 4 | 13 | 26 | 15 | 36 | 39 | 31 | 18 | 10 | 2 | 0 | 1 | 211 | |
| | 8 | 2 | 2 | 7 | 9 | 18 | 11 | 27 | 24 | 18 | 8 | 5 | 5 | 2 | 138 | |
| | 9 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 6 | 8 | 6 | 10 | 8 | 2 | 3 | 2 | 54 | |
| | 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 14 | 9 | 3 | 4 | 4 | 45 | |
| | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 3 | 19 | |
| | Σ | 131 | 68 | 137 | 155 | 147 | 193 | 191 | 113 | 87 | 47 | 16 | 16 | 12 | 1313 | |

Anmerkung: Farblich hervorgehoben die Müdigkeitsstufen durch die Fremdreferenzierung.

Ebenfalls interessant ist, dass es auch den umgekehrten Fall gibt. Es gibt Fahrer, die beurteilen sich selbst bereits mit einer 8, werden aber durch die Fremdreferenzierung mit einer 2 beurteilt. Dieses Ergebnis könnte sich eventuell durch das Time-Sampling-Verfahren ergeben. Hier wäre es möglich, dass der bewertete Fahrer im Beobachtungszeitraum exakt ein Anzeichen für diesen hohen Müdigkeitswert zeigte und dementsprechend kategorisiert wurde.

Eine weitere Möglichkeit für die Unterschiede könnte auch darin begründet sein, dass in dieser ersten Analyse noch beide Fahrumgebungen zusammen betrachtet wurden. Um zu prüfen, inwiefern die Fahrumgebungen das Ergebnis der Übereinstimmung verändern, wurden diese in einem weiteren Analyseschritt separat betrachtet. Erwarten würde man hier, dass in Umgebungen, die weniger Aktivität des Fahrers verlangen die Übereinstimmung der beiden Verfahren besser ist, als in Umgebungen die ein hohes Maß an Aktivität erfordern.

4.2.2 Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für die Realfahrten

Insgesamt können für die Analysen $n = 982$ Beobachtungseinheiten verwendet werden. Es ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Müdigkeitsreferenzierungssystemen von $r = .475$; $p = .000$ für beide Studien. Für die erste Realfahrtstudie findet sich eine Korrelation von $r = .499$; $p = .000$, für die zweite von $r = .610$; $p = .000$. Im Vergleich zur Betrachtung mit sämtlichen Bedingungen kommt es, zumindest für die erste Realfahrtstudie, zu einem Absinken des Zusammenhangs. Die Gegenüberstellung der Referenzierungsverfahren für beide Realfahrten zeigt ein ähnliches Bild (Abbildung 30) wie zuvor. Was sich allerdings zeigt ist, dass extrem hohen Bewertungen wie zuvor (Wert von 12 bzw. 13) in den Realfahrtstudien nicht vorgekommen sind.

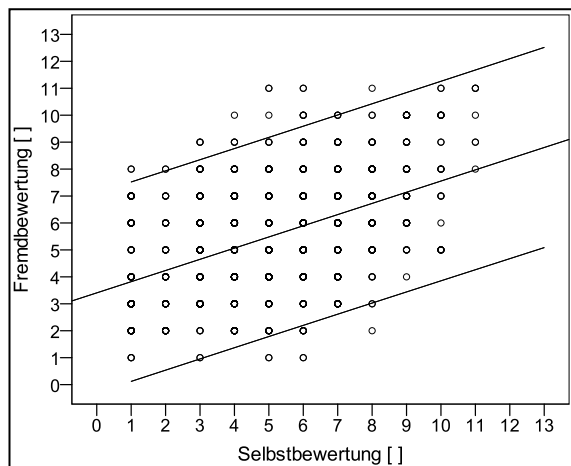


Abbildung 30: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit für beiden Realfahrtstudien mit eingezeichneter Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall.

Dies lässt sich gut aus Tabelle 20 entnehmen. Hier zeigt sich wieder, dass die Selbstbeurteilung der Fahrer, vor allem im wachen Zustand, oftmals weit unter der Fremdreferenzierung liegt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte der beiden Realfahrtstudien.

| | | Selbstbewertung | | | | | | | | | | | | Σ |
|---------------------|----|-----------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | |
| Fremdbewer- tung | 1 | 3 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | |
| | 2 | 19 | 12 | 3 | 13 | 8 | 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 62 | |
| | 3 | 35 | 12 | 29 | 17 | 10 | 9 | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 | 126 | |
| | 4 | 12 | 8 | 17 | 31 | 32 | 21 | 19 | 3 | 1 | 0 | 0 | 144 | |
| | 5 | 5 | 6 | 20 | 14 | 25 | 34 | 17 | 12 | 4 | 6 | 0 | 143 | |
| | 6 | 14 | 7 | 19 | 23 | 15 | 26 | 29 | 18 | 14 | 1 | 0 | 166 | |
| | 7 | 15 | 4 | 12 | 24 | 15 | 27 | 27 | 20 | 9 | 3 | 0 | 156 | |
| | 8 | 2 | 2 | 7 | 9 | 17 | 11 | 19 | 15 | 10 | 4 | 1 | 97 | |
| | 9 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 6 | 8 | 5 | 6 | 2 | 2 | 38 | |
| | 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 13 | 6 | 1 | 31 | |
| | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 | 10 | |
| | Σ | 105 | 51 | 112 | 135 | 130 | 148 | 134 | 79 | 57 | 24 | 7 | 982 | |

Anmerkung: Farblich hervorgehoben die Müdigkeitsstufen durch die Fremdreferenzierung.

In den mittleren und oberen Müdigkeitswerten (Müdigkeitsstufe gelb und rot) kommt es wieder zu einer besseren Übereinstimmung der beiden Bewertungsverfahren. Ansatzweise zeigt sich hier, dass die Erwartung, dass die Übereinstimmung in monotoneren Situationen besser ausfällt bestätigt werden kann. In der zweiten Realfahrtstudie, in der nur eine Autobahn verwendet wurde, zeigt sich ein höherer Zusammenhang.

4.2.3 Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für die Simulatorfahrten

Wie sich bis jetzt gezeigt hat, kommt es in der ersten Realfahrtstudie zu einer Verringerung des Zusammenhangs der beiden Verfahren. Um zu prüfen, wie sich dies in der simulierten Fahrumgebung verhält, wurde auch hier der Zusammenhang von subjektiver und objektiver Müdigkeitsbewertung geprüft. Insgesamt stehen für diese

Analyse n = 331 Beobachtungseinheiten zur Verfügung. Für die vorliegenden Daten ergibt sich in dieser Simulatorstudie ein signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Referenzierungsverfahren von $r = .727$; $p = .000$ (Abbildung 31).

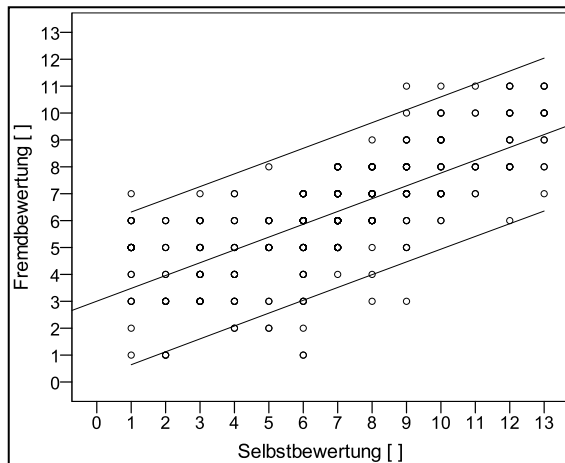


Abbildung 31: Fremd- und Selbstbewertung der Müdigkeit für die erste Simulatorstudie mit eingezeichneter Regressionsgeraden und 95%igen Konfidenzintervall.

Wie man aus Abbildung 31 sowie aus Tabelle 21 entnehmen kann, zeigt sich vor allem in den unteren Müdigkeitswerten eine durchgehend bessere Übereinstimmung der beiden Bewertungsverfahren im Vergleich zu den Realfahrten. Diese setzt sich fast durchgehend fort, lediglich am Ende der Skala finden sich auf der Seite der Selbstreferenzierung Höchstwerte (Wert 12 und 13), welche von den Ratern nicht vergeben wurden.

Tabelle 21: Subjektive und objektive Müdigkeitswerte der ersten Simulatorstudie.

| | | Selbstbewertung | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Σ | |
| Fremdbewertung | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | |
| | 3 | 3 | 6 | 7 | 4 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27 | |
| | 4 | 2 | 2 | 6 | 5 | 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | |
| | 5 | 13 | 3 | 6 | 4 | 7 | 10 | 11 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58 | |
| | 6 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 | 16 | 25 | 10 | 3 | 2 | 0 | 1 | 0 | 78 | |
| | 7 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 9 | 12 | 11 | 9 | 7 | 2 | 0 | 1 | 55 | |
| | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 8 | 9 | 8 | 4 | 4 | 5 | 2 | 41 | |
| | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 6 | 0 | 3 | 2 | 16 | |
| | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 14 | |
| | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 9 | |
| | Σ | 26 | 17 | 25 | 20 | 17 | 45 | 57 | 34 | 30 | 23 | 9 | 16 | 12 | 331 | |

Anmerkung: Farblich hervorgehoben die Müdigkeitsstufen durch die Fremdreferenzierung.

4.2.4 Vergleich Müdigkeitsreferenzierungsverfahren für Autobahn und Landstraße

In den Analysen zuvor konnte gezeigt werden, dass der Zusammenhang der beiden Verfahren in der Realität ($r = .475$) geringer ausfällt als in der Simulation ($r = .727$). Zwar ist davon auszugehen, dass die Verfahren unabhängig vom Straßen-

typ sind, eine Aussage darüber ist jedoch erst durch einen Vergleich möglich welche nachfolgend berichtet wird.

Tabelle 22: Korrelationen der beiden Müdigkeitsreferenzierungen für Landstraße und Autobahn im Simulator sowie in der Realfahrt.

| Fahrumgebung | Straßentyp | Anzahl Beobachtungseinheiten | Korrelation | p-Wert |
|-----------------|------------|------------------------------|-------------|--------|
| Real (Studie 1) | Landstraße | 254 | .561 | .000 |
| | Autobahn | 728 | .467 | .000 |
| Simulation | Landstraße | 169 | .714 | .000 |
| | Autobahn | 162 | .795 | .000 |
| Σ | | 1313 | .556 | .000 |

Wie sich Tabelle 22 entnehmen lässt, fällt die Korrelation für die beiden Straßenabschnitte in der Simulation ($r_{AB} = .795$; $r_{LS} = .714$) erwartungsgemäß höher aus als in der Realfahrt ($r_{AB} = .467$; $r_{LS} = .561$). Das Interessante an diesem Ergebnis ist allerdings, dass die Übereinstimmung der beiden Referenzierungsverfahren in der Realität auf der Landstraße höher ausfällt als auf der Autobahn. In der Simulation zeigt sich hingegen genau der gegenteilige Effekt.

Da die Entwicklung und Verwendung der SOMS ein maßgeblicher Teil dieser Arbeit ist, werden die Ergebnisse bzgl. Verlauf und Bewertungsverfahren im Anschluss ausführlich diskutiert.

4.2.5 Diskussion Müdigkeitsreferenzierungssystem

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede der Selbst- und Fremdbewertung bzgl. des Müdigkeitsverlaufs und der Höhe der Müdigkeitsausprägung besprochen. Zudem werden die Ergebnisse bzgl. des Zusammenhangs der beiden Verfahren diskutiert.

Generell zeigt sich über alle Studien hinweg in beiden Verfahren ein Anstieg der Müdigkeit. Was zudem zu beobachten ist, ist, dass gegen Ende der Versuche ein Müdigkeitsplateau erreicht wurde. Dies legt den Schluss nahe, dass selbst ein längerer Versuch nicht zwangsläufig zu höheren Müdigkeitswerten geführt hätte. Der Erfolg der Müdigkeitsinduktion kann maßgeblich darauf zurückgeführt werden, dass die gewählten Strecken sowohl im Simulator als auch in der Realität sehr monoton gehalten wurden.

Hinsichtlich der Höhe der vergebenen Müdigkeitswerte ist vor allem der Vergleich der ersten Simulatorstudie mit den zwei Realfahrtstudien interessant. Ist in der Simulatorstudie kein Unterschied zwischen den Bewertungsverfahren zu finden, so gibt es in Realfahrt 1 einen tendenziellen, in Realfahrt 2 einen signifikanten Unterschied zwischen den Verfahren in Bezug auf die Höhe der Müdigkeitswerte.

Dieser Unterschied zeigt sich auch in der Korrelation. Diese fällt für die erste Simulatoruntersuchung am höchsten aus. Dies könnte daran liegen, dass Fahrer im echten Fahrzeug mehr Aktivitäten zeigen als im Simulator und es dadurch für die Rater schwierig ist, die Müdigkeitsanzeichen richtig zu erkennen.

Der nicht vorhandene Unterschied in der Höhe der Bewertungen im Fahrsimulator könnte dadurch erklärt werden, dass die äußerlich gezeigte und innerlich gefühlt Mü-

digkeit näher zusammen liegen. Zudem kommt im Simulator wahrscheinlich auch der Effekt zum Tragen, dass die Versuchspersonen ihre Müdigkeit ehrlicher bewerten, da keine Konsequenzen zu befürchten sind.

Vergleicht man die Studien, in denen auf beiden Straßentypen (Landstraße und Autobahn) gefahren wurde, so sieht man zumindest deskriptiv, dass sich die Fahrer selbst müder bewerten als dies durch die Fremdreferenzierung der Fall ist. Interessant ist, dass der Zusammenhang auf der simulierten Landstraße geringer ausfällt als auf der simulierten Autobahn. Dies könnte daran liegen, dass die Fahrer auf der Landstraße eine höhere Aktivität und wenig Anzeichen von Müdigkeit zeigen, die von den Ratern erkannt werden können.

Ein interessantes Ergebnis zeigt sich auch zwischen Realfahrt 1 und 2. Hier zeigen sich die Auswirkungen der höheren Monotonie der Strecke durch die reine Autofahrt in Realfahrt 2. Die Teilnehmer erreichten im Mittel einen Müdigkeitswert von ca. 7, während dieser auf der Landstraße-Autobahnstrecke aus Realfahrt 1 am Ende des Versuchs bei ca. 6 lag. Dieser Unterschied wird auch deutlich, wenn man die Verteilung der einzelnen Müdigkeitswerte betrachtet. Zudem befinden sich in Realfahrt 2 mehr Personen als in Realfahrt 1 im roten Müdigkeitsbereich. Die Unterschiede in der Höhe der beiden Müdigkeitsbewertungen könnten sich dadurch ergeben, dass die Müdigkeitsanzeichen der Fahrer auf einer monotoneren Strecke (Autobahn) besser für die Rater zu beobachten sind, die Fahrer aber selbst auf Grund der geringen Anforderung der Situation keine Müdigkeit verspüren.

Was sagen uns diese Erkenntnisse nun über das verwendete Müdigkeitsreferenzierungssystem?

Es kann postuliert werden, dass das Verfahren prinzipiell gute Ergebnisse hinsichtlich der Müdigkeitsreferenzierung liefert. Vor allem in einer Umgebung, in denen Fahrer keine Konsequenzen für ihr Fahrverhalten befürchten müssen (Simulator), zeigen sich die Stärken des Referenzierungssystems. In Situationen, in denen ein unangemessenes Fahrverhalten auch tatsächlich zu Konsequenzen führen kann (Realverkehr), ist grundsätzlich der Fremdreferenzierung mehr Vertrauen auszusprechen. Zwar könnte die Methode des Time-Sampling-Verfahrens durch die nicht kontinuierliche Bewertung diesen schlechteren Zusammenhang erklären, es wird allerdings vermutet, dass die subjektive Fehleinschätzung (auch bedingt durch soziale Erwünschtheit) den größeren Anteil daran hat. Allerdings bedarf es der exakten Klärung der Einflussgrößen noch weitere Studien.

Die nun folgenden Analysen zu Unterschieden in den Fahrparametern in Abhängigkeit der Müdigkeit werden für Fahrten auf simulierten bzw. realen Autobahnen durchgeführt. Der Grund hierfür ist, dass die Datenmenge für eine abhängige Analyse die auch die Landstraße berücksichtigt zu gering ist.

Wie sich in der Überprüfung des Müdigkeitsreferenzierungsverfahrens gezeigt hat, ist vor allem auf einer realen Autobahn der Fremdreferenzierung mehr Bedeutung beizumessen, da die gezeigten Müdigkeitsanzeichen der Fahrer sehr gut erkannt werden können, die Fahrer ihre Müdigkeit jedoch unterschätzen. Aus diesem Grund werden für die nachfolgenden Analysen die Fremdbewertungsurteile für die Einteilung in die jeweilige Müdigkeitsstufe verwendet.

4.3 Abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens (Autobahn)

Für die gemeinsame Datenanalyse wurden aus allen vier Studien jene Personen extrahiert, die Müdigkeitswerte in allen drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) aufwiesen. Da sich durch diese Extraktion eine neue Stichprobe ergibt, wird diese nachfolgend beschrieben. Nach der Stichprobenbeschreibung erfolgt die Analyse der Fahrdaten, um Aussagen über die Veränderung des Fahrverhaltens von der grünen über die gelbe bis zur roten Müdigkeitsstufe zu erhalten. Es wurden nur jene Fahrten aufgenommen, die auf der Autobahn stattfanden. Abgeschlossen wird die Datenanalyse mit einer Diskussion der vorliegenden Ergebnisse.

4.3.1 Substichprobenbeschreibung

Das durchschnittliche Alter der 27 Versuchspersonen (15 weiblich) liegt bei 27.8 (SD = 9.3) Jahren. Die durchschnittliche Schlafdauer in der Nacht vor dem Versuch beträgt 7.1 Stunden (SD = 1.2). Diese Schlafdauer unterscheidet sich nicht signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer der Versuchspersonen an anderen Tagen (t-test für abhängige Stichproben: $t_{(26)} = .785$; $p = .439$). Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Mittel 10.6 Stunden (SD = 3.3).

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Schnitt 12.000 km (SD = 10.000) fahren. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt bei einem Mittelwert von 285.000 km (SD = 951.000 km) (Median = 50.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung erstreckt sich von 1.500 km bis 5.000.000 km. Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 9.4 Jahre (SD = 9.3) in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B bzw. 3.

4.3.2 Erfasste Müdigkeitsstufen

Die Verteilung der - durch die Zusammenlegung der vier Studien - erfassten Müdigkeitswerte ist aus Tabelle 23 ersichtlich. Zudem gibt Tabelle 23 auch Auskunft darüber, aus welcher der vier Studien die jeweilige Versuchsperson (Spalte Studie) entstammt.

Tabelle 23: Versuchspersonen aus den jeweiligen Studien und dazugehörige Müdigkeitswerte.

| Studie | VP | Müdigkeitswert | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 6 | | 1 | | | 1 | 3 | 5 | | 3 | | | | |
| 1 | 7 | | | 1 | | 1 | 6 | 4 | 3 | | 1 | 1 | | |
| 1 | 10 | | | 1 | | | | 2 | 6 | 2 | | 1 | | |
| 1 | 31 | | | 1 | | 1 | 1 | | 2 | 1 | 3 | 4 | | |
| 2 | 21 | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 9 | 4 | | | | | |
| 3 | 1 | | | 1 | | 1 | 4 | 8 | 6 | | | | | |
| 3 | 2 | | | 1 | 3 | 3 | 7 | 6 | 2 | | | | | |
| 3 | 4 | | | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | | | | | |
| 3 | 9 | | | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | | |
| 3 | 11 | | | | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | | | | |
| 3 | 12 | | | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 | 1 | 3 | | | |
| 3 | 13 | | | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | | | | | |
| 3 | 14 | | | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | | | | | |
| 3 | 15 | | | | 1 | 5 | 3 | 4 | 3 | 3 | | | | |
| 3 | 18 | | | | 4 | 4 | 3 | 2 | 7 | | | | | |
| 3 | 19 | | 2 | | | | 1 | 3 | 3 | 3 | 7 | | | |
| 4 | 9 | | 2 | | | | 3 | | 3 | 4 | | | | |
| 4 | 12 | 1 | 2 | | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | | | | |
| 4 | 19 | | | 2 | | 1 | 1 | 5 | 1 | | 1 | | | |
| 4 | 20 | 1 | | | 1 | | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | | | |
| 4 | 41 | | | 2 | 1 | 2 | 1 | 5 | 1 | | | | | |
| 4 | 46 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | | | | | |
| 4 | 47 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | | | |
| 4 | 48 | | | | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | | | | |
| 4 | 54 | | | | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 4 | 55 | | | | 1 | 1 | 5 | 3 | 2 | | | | | |
| 4 | 56 | | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | | | |

Anmerkung: Die drei Müdigkeitsstufen (wach - grün, müde - gelb, stark müde - rot) sind farblich hervorgehoben.

Wie sich für vorliegende Daten zeigt, konnten sowohl von Studie 1 als auch von Studie 2 nur sehr wenige Probanden aufgenommen werden. Wie sich aus Tabelle 23 weiter entnehmen lässt, liegen bei einigen Teilnehmern mehrere Müdigkeitswerte pro Müdigkeitsstufe vor. Um die Auswertung nach einem abhängigen Versuchsdesign über die drei Müdigkeitsstufen hinweg zu ermöglichen, wurden die einzelnen Müdigkeitswerte je Müdigkeitsstufe und Teilnehmer gemittelt und dann für die Analysen verwendet (siehe Kapitel 4).

4.3.3 Experimentelles Design

In der Substichprobe sind beide Fahrumgebungen (Simulator und Real) vorhanden woraus sich die erste unabhängige Variable ergibt. Den zweiten Faktor stellen

die drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) dar, welche als Innersubjektfaktor verwendet wurden. Somit ergibt sich ein 2x3 Design mit Messwiederholung auf dem zweiten Faktor (Müdigkeitsstufe) (Tabelle 24).

Tabelle 24: Studiendesign und Anzahl der jeweiligen Müdigkeitswerte in den einzelnen Versuchsbedingungen für die abhängige Analyse.

| | | Müdigkeitsstufe | | | |
|--------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Grün | Gelb | Rot | Σ |
| Fahrumgebung | Simulator | 15 (33) | 15 (83) | 15 (40) | 15 (156) |
| | Real | 12 (34) | 12 (126) | 12 (69) | 12 (229) |
| Σ | | 27 (67) | 27 (209) | 27 (109) | 27 (385) |

Anmerkung: Werte in Klammern stellen die Anzahl der einzelnen Müdigkeitswerte dar (vgl. Tabelle 23).

Für die Operationalisierung der Müdigkeitsauswirkungen wurde das Fahrverhalten verwendet. Die Auswahl der Fahrparameter, die in den Analysen verwendet wurden erfolgt zum einen auf Grundlage der in der Literatur gefundenen Ergebnisse (vgl. Kapitel 2.6.1), zum anderen wurden auch Variablen getestet, für die noch keine Befunde vorliegen (z.B. TDLC). Parameter, die eine bestimmte Größe zur Müdigkeitsbestimmung vorab festlegen wie z.B. das Ellipsenkriterium oder die SWRR wurden bewusst nicht für die Analysen verwendet. Grund hierfür war, dass die Einteilung der Müdigkeit nach den beobachtbaren Anzeichen von Müdigkeit durch die Fremdreferenzierung erfolgte. Auf die Aufnahme der minimalen Geschwindigkeit in die Berechnungen wurde verzichtet, da diese durch die Voranalyse der Rohdaten auf 80 km/h beschränkt wurde. Dies wurde eingeführt, da sich ein Großteil der Müdigkeitsunfälle auf Landstraßen und Autobahnen ereignen und dort mit Geschwindigkeiten ab dem gesetzten Grenzwert zu rechnen ist.

Für sämtliche Berechnungen wurden folgende abhängige Variablen (AVs) herangezogen:

- Parameter des Lenkverhaltens
 - Standardabweichung des Lenkradwinkels
 - Absolut größter Lenkradwinkelwert (richtungsunabhängig)
- Parameter der Spurhaltung
 - Mittelwert des Abstands zum rechten Rand
 - Standardabweichung zum rechten Rand
 - Absolut größte Abweichung vom rechten Rand
 - Prozentuelle Zeit innerhalb 10 Minuten, die näher als 10 cm zum rechten Rand befahren wurden (TDLC)
 - Mittelwert der Time to Line Crossing
 - Standardabweichung der Time to Line Crossing
- Parameter des Geschwindigkeitsverhaltens:
 - Mittelwert der Geschwindigkeit
 - Standardabweichung der Geschwindigkeit
 - Maximale Geschwindigkeit

Die Analysen zu den Fahrparametern erfolgen nach den drei beschriebenen Clustern (Lenkverhalten, Spurhaltung, Geschwindigkeitsverhalten), da diese unterschiedliche Aspekte des Fahrverhaltens erfassen. So bildet der Lenkradwinkel das direkte Interaktionsverhalten des Fahrers mit dem Fahrzeug ab, und muss über die Reaktionen des Fahrzeugs aufgrund der Lenkeingabe kontrolliert werden. Es handelt sich hier hauptsächlich um unbewusste Regulationsvorgänge auf der Stabilisierungsebene. Die Spurhaltung erfordert mehr kognitive Ressourcen, da die eingehenden visuellen Informationen erst entsprechend analysiert werden müssen, die Position des Fahrzeugs in der Spur geschätzt bzw. berechnet, und erst dann die Korrekturen für die korrekte Spurhaltung über die Lenkeingabe ausgeführt werden. Die Geschwindigkeit hingegen kann direkt aus dem Kombiinstrument abgelesen werden. Für diesen Parameter sind Aspekte wie Verkehrsvorschriften, Straßenzustand, Verkehrsdichte usw. besonders relevant. Zudem lässt sich durch die Variation der Geschwindigkeit die Aufgabenschwierigkeit maßgeblich verändern.

Im nächstfolgenden Schritt werden die einzelnen Cluster mit den dazugehörigen abhängigen Variablen analysiert und die Ergebnisse präsentiert.

4.3.4 Ergebnisse Fahrverhalten

4.3.4.1 Lenkverhalten

Als erster Parameter wurde der Lenkradwinkel ausgewertet. Es sollte geprüft werden, ob die Personen mit zunehmender Müdigkeit ein verändertes Lenkverhalten zeigen. Zusätzlich sollte analysiert werden ob zwischen den beiden Fahrumgebungen Unterschiede im Lenkverhalten bestehen.

Es kann ein signifikanter Unterschied im Lenkradwinkel zwischen den beiden Fahrumgebungen gefunden werden. Zudem unterscheidet sich das Lenkverhalten zwischen den drei Müdigkeitsstufen signifikant. Es kann keine signifikante Interaktion gefunden werden (Tabelle 25).

Tabelle 25: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Lenkradwinkel | F | df | p | η^2 |
|--|--------|----------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 91.72 | 2/24 | .000* | .884 |
| HE Müdigkeitsstufe | 2.79 | 4/100 | .030* | .101 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 1.95 | 4/100 | .106 | .073 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 112.63 | 1/25 | .000* | .818 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 6.48 | 1/25 | .017* | .206 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 5.66 | 1.3/33.5 | .015* | .185 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 0.82 | 2/50 | .444 | .032 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 1.47 | 1.3/33.5 | .241 | .056 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 1.66 | 2/50 | .199 | .062 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Als Haupteffekt Fahrumgebung ergibt sich eine signifikant größere Standardabweichung des Lenkradwinkels in der Fahrsimulation (2.9°) im Vergleich zur realen Fahrumgebung (1.4°) (Abbildung 32).

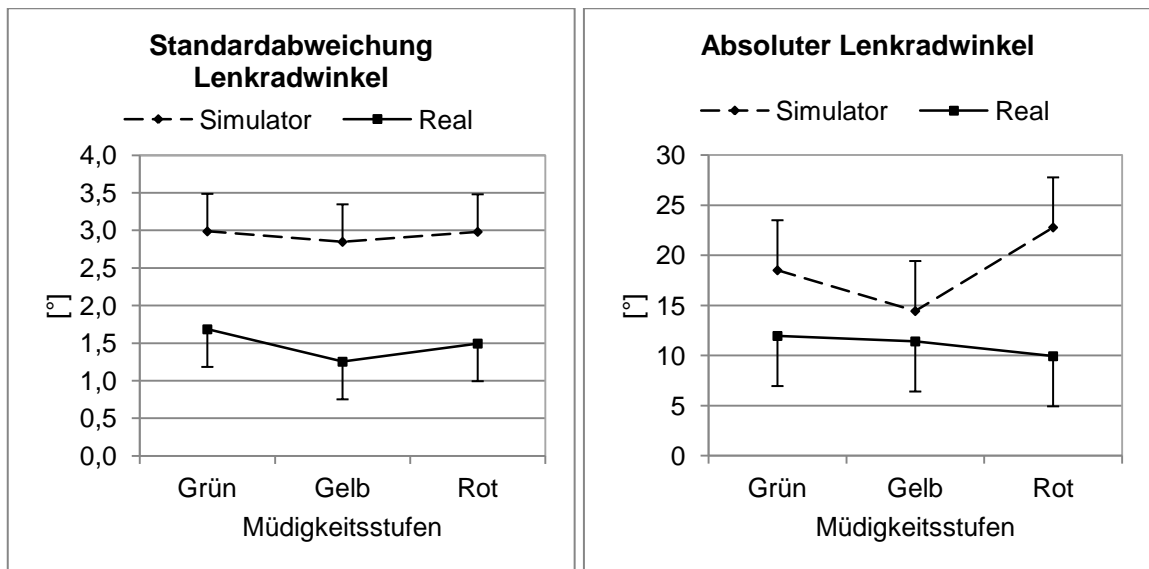


Abbildung 32: Standardabweichung und absoluter Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Das gleiche Bild hinsichtlich des Haupteffekts Fahrumgebung zeigt sich auch im absoluten Lenkradwinkel, welcher in der Fahrsimulation ($18,5^\circ$) ebenfalls signifikant größer ausfällt als auf der realen Straße ($11,1^\circ$) (Abbildung 32).

Unabhängig von der Fahrumgebung zeigt sich hinsichtlich der Müdigkeitsstufen, dass es zu einer signifikanten Verringerung in der Standardabweichung des Lenkradwinkels von der grünen ($2,3^\circ$) zur gelben Müdigkeitsstufe ($2,0^\circ$) kommt. Von der gelben zur roten ($2,2^\circ$) Müdigkeitsstufen steigt die Schwankung um den mittleren Lenkradwinkel wieder signifikant an, erreicht allerdings nicht mehr das Niveau von der grünen Stufe (Abbildung 32).

Insgesamt zeigt sich für den Lenkradwinkel, dass die Lenkaktivität von den wachen Fahrern zu den mittel müden Fahrern abfällt und dann wieder ansteigt. Zudem werden in der Simulation größere Lenkradwinkel beobachtet und es wird auch mehr Lenkaktivität gezeigt. Diese Ergebnisse zeigen, dass wache Fahrer mehr Lenkaktivität zeigen als müde Fahrer. Hierdurch lassen sich auch die absoluten Lenkradwinkel erklären, die zur Korrektur notwendig sind. Allerdings lässt sich dadurch nicht der Unterschied zwischen der Simulation und der Realität erklären. Hier könnte die höhere Genauigkeit des im Fahrsimulator verwendeten Lenkwinkelsensors eine Rolle spielen. Ebenso könnte durch die fehlende kinästhetische Rückmeldung im Simulator dieser Unterschied zustande kommen.

4.3.4.2 Spurhaltung

Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Spurhaltemaßen zwischen den beiden Fahrumgebungen. Zudem unterscheiden sich die Fahrparameter in Abhängigkeit der drei Müdigkeitsstufen. Interaktionen können keine festgestellt werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Spurhaltung | F | df | p | η^2 |
|--|-------|------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 10.46 | 4/22 | .000* | .653 |
| HE Müdigkeitsstufe | 3.68 | 8/96 | .001* | .235 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 1.52 | 8/96 | .161 | .112 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 8.04 | 1/25 | .009* | .243 |
| Standardabweichung rechter Rand | 7.22 | 1/25 | .013* | .224 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 1.07 | 1/25 | .310 | .041 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 8.95 | 1/25 | .006* | .264 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 1.09 | 2/50 | .344 | .042 |
| Standardabweichung rechter Rand | 5.19 | 2/50 | .009* | .172 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 8.49 | 2/50 | .001* | .254 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 5.75 | 2/50 | .006* | .187 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 0.40 | 2/50 | .671 | .016 |
| Standardabweichung rechter Rand | 2.71 | 2/50 | .076 | .098 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 0.26 | 2/50 | .769 | .010 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 0.99 | 2/50 | .378 | .038 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

In der Realität (.95 m) wird im Mittel mehr Abstand zum Rand gehalten als in der Simulation (.72 m) (Abbildung 33), wohingegen die Schwankungen um diesen Mittelwert in der Simulation (.42 m) höher ausfallen als in der Realität (.30 m) (Abbildung 33).

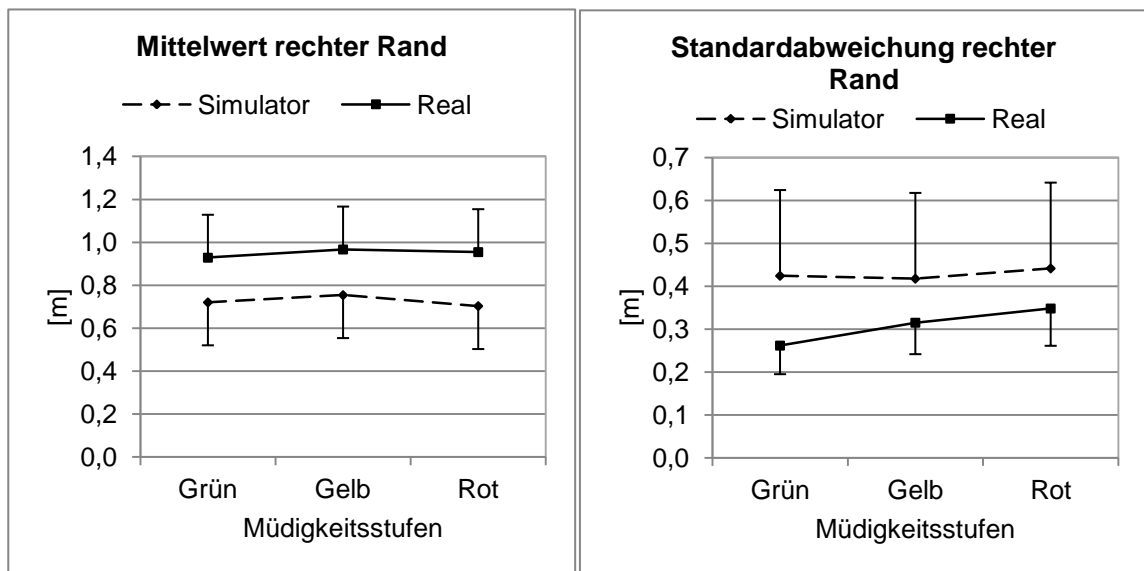


Abbildung 33: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

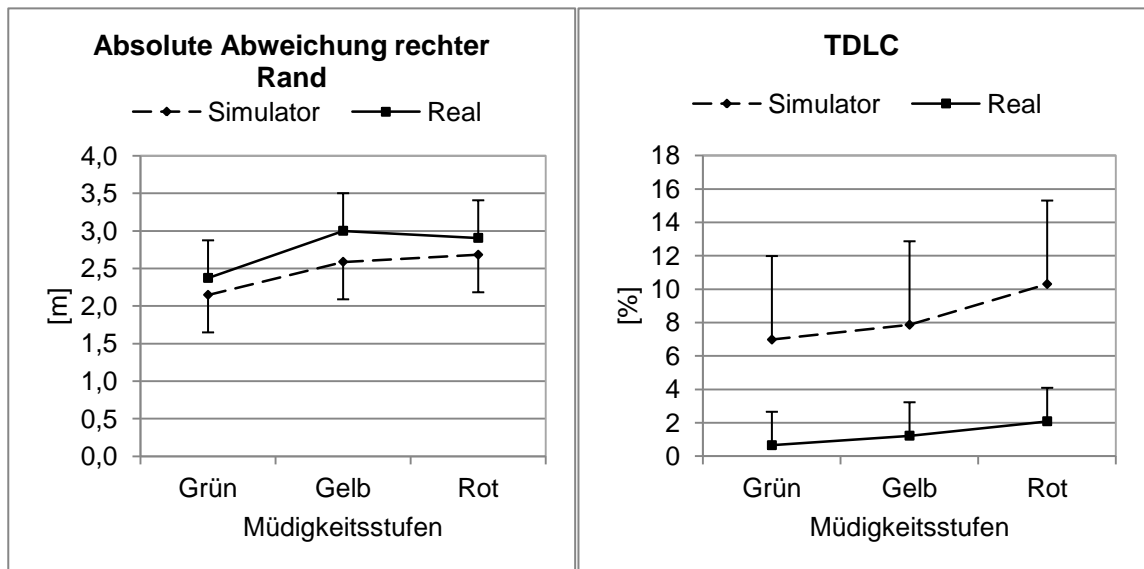


Abbildung 34: Absolute Abweichung vom rechten Rand und prozentuelle Zeit näher 10 cm zum rechten Rand (TDLC) in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Für die absolute Abweichung vom rechten Rand zeigt sich kein Unterschied zwischen den beiden Fahrumgebungen. Die Betrachtung der TDLC zeigt, dass in der Simulation (8.3 %) diese Fläche signifikant länger befahren werden als in der realen Fahrumgebung (1.8 %) (Abbildung 34).

Für den Haupteffekt Müdigkeitsstufe zeigen sich Unterschiede in der Standardabweichung vom rechten Rand. Hierbei steigt die Standardabweichung von der grünen (.34 m) zur gelben (.36 m) und von der gelben zur roten (.39 m) Müdigkeitsstufe signifikant an (Abbildung 33).

Die absolute Abweichung zum rechten Rand wird mit zunehmender Müdigkeit signifikant größer, wobei dieser Effekt nur von der grünen (2.2 m) zur gelben (2.7 m) und von der grünen zur roten (2.7 m) Stufe beobachtet werden kann.

Für die TDLC zeigt sich ein ähnlicher Effekt. Hier findet sich ebenfalls ein Anstieg von der grünen (3.8 %) zur gelben (4.5 %) Stufe, jedoch nur ein tendenzieller Anstieg von der gelben zur roten (6.1 %) Müdigkeitsstufe (Abbildung 34).

Für die Spurhaltung lässt sich festhalten, dass sich die beiden Fahrumgebungen hinsichtlich der Fahrparameter unterscheiden, wobei die Personen im Realverkehr mehr zur Spurmitte hin fahren und weniger um diese gewählte Idealspur schwanken. Zudem nähern sie sich auch dem rechten Rand weniger oft an als dies in der Simulation zu finden ist. Der Müdigkeitseinfluss zeigt sich durchgängig mit einem Anstieg in den erhobenen Fahrparameter, außer im mittleren Abstand zum rechten Rand wo sich kein Unterschied zwischen den Müdigkeitsstufen ergibt.

Was sich hier schon zeigt ist, dass die Fahrer in der Realität durch die Spurhaltung versuchen möglichst in der Mitte der Spur zu fahren. Dies kann als Sicherheitsverhalten interpretiert werden. Auch bei zunehmender Müdigkeit wird in der Realität dieses Verhalten weitestgehend beibehalten.

4.3.4.3 Time to Line Crossing (TLC)

Dieser Parameter sagt aus, wie lange der Fahrer noch braucht, um die Spur zu kreuzen. Zwar ist die TLC auch ein Maß für die Spurhaltung, es ist hier jedoch nicht ausreichend, nur die Informationen hinsichtlich des Abstands zum Rand zu verrechnen. Zudem müssen zusätzlich noch die aktuelle Geschwindigkeit sowie die Lenkradstellung für die Schätzung bzw. Berechnung bis zum Überfahren der Spurmarkierung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird dieser Parameter separat analysiert.

Es zeigen sich signifikante Effekte für die Fahrumgebung, die Müdigkeitsstufen und die Interaktion (Tabelle 27).

Tabelle 27: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Time to Line Crossing | F | df | p | η^2 |
|--|--------|------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 321.63 | 2/24 | .000* | .964 |
| HE Müdigkeitsstufe | 12.10 | 2/50 | .000* | .326 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 9.21 | 2/50 | .000* | .269 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 28.45 | 1/25 | .000* | .532 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 596.16 | 1/25 | .000* | .958 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 5.57 | 2/50 | .007* | .182 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 11.79 | 2/50 | .000* | .321 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 1.90 | 2/50 | .160 | .071 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 2.26 | 2/50 | .115 | .083 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Für den Haupteffekt Fahrumgebung zeigen sich signifikante Unterschiede in der mittleren TLC, wobei dieser Wert in der realen Fahrumgebung (2.0 sek) höher ist als in der simulierten Fahrumgebung (1.7 sek) (Abbildung 35). Die Standardabweichung verhält sich hingegen genau umgekehrt. Hier finden sich im realen Verkehrsgeschehen (.15 sek) signifikant kleinere Werte wieder im Vergleich zur Simulation (.79 sek) (Abbildung 35).

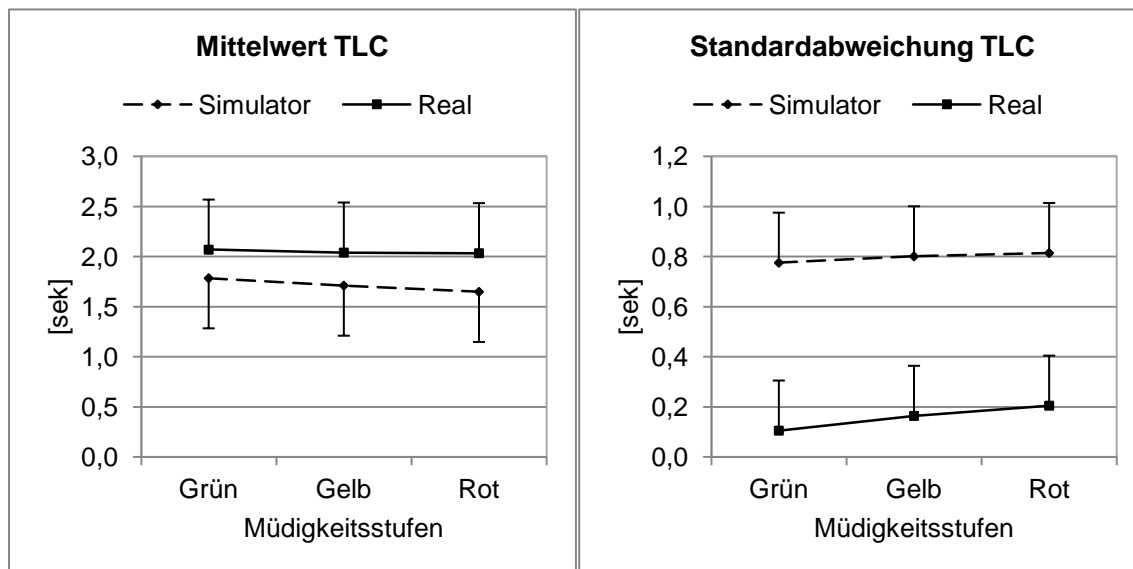


Abbildung 35: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Hinsichtlich der Müdigkeitsstufen zeigt sich für den Mittelwert der TLC eine signifikante Abnahme von der grünen (1,9 sek) zur roten Müdigkeitsstufe (1,8 sek) hin (Abbildung 35). Für die Standardabweichung der TLC zeigt sich genau der gegenteilige Effekt. Hier findet ein Anstieg der Werte von der grünen (.44 sek) zur gelben (.48 sek) sowie von der grünen zur roten (.51 sek) Müdigkeitsstufe statt (Abbildung 35).

Wie zu erwarten, versuchen die Fahrer in der Realität das Überfahren der Fahrspurmarkierung zu vermeiden, indem sie größere zeitliche Abstände einhalten als in der Simulation. Zudem ist auch die Schwankung in der Realität geringer als in Fahr-simulator. Zusätzlich zeigt sich aber, dass die Fahrer mit zunehmender Müdigkeit ihren zeitlichen Abstand zum rechten Rand verringern und größerer Schwankungen beobachtet werden konnten.

4.3.4.4 Geschwindigkeitsverhalten

Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt für die Fahrumgebung sowie für die Müdigkeitsstufen. Ebenso findet sich eine signifikante Interaktion (Tabelle 28).

Tabelle 28: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Geschwindigkeit | F | df | p | η^2 |
|--|-------|------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 20.31 | 3/23 | .000* | .726 |
| HE Müdigkeitsstufe | 5.23 | 6/98 | .000* | .243 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 2.88 | 6/98 | .013* | .150 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 51.84 | 1/25 | .000* | .675 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 3.56 | 1/25 | .071 | .125 |
| Maximale Geschwindigkeit | 57.45 | 1/25 | .000* | .699 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 19.12 | 2/50 | .006* | .433 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 3.43 | 2/50 | .040* | .121 |
| Maximale Geschwindigkeit | 6.98 | 2/50 | .002* | .218 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 9.20 | 2/50 | .000* | .269 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 0.69 | 2/50 | .502 | .027 |
| Maximale Geschwindigkeit | 3.68 | 2/50 | .032* | .129 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Univariat betrachtet unterscheiden sich die mittlere und maximale Geschwindigkeit signifikant in Abhängigkeit der Fahrumgebung, wobei unter realen Fahrbedingungen (MW: 110 km/h vs. 123 km/h; MAX: 122 km/h vs. 142 km/h) eine geringere Geschwindigkeit gefahren wird. Tendenziell signifikante Unterschiede finden sich für die Standardabweichung der Geschwindigkeit, wobei diese in der Realität geringer ausfällt als in der simulierten Fahrumgebung (6.7 km/h vs. 10.2 km/h) (Abbildung 36 & Abbildung 37).

Für den Haupteffekt Müdigkeit zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Müdigkeitsstufen für alle drei Geschwindigkeitsparameter. Für die mittlere Geschwindigkeit zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen allen drei Müdigkeitsstufen. Hierbei steigt die Geschwindigkeit von der grünen (113 km/h) zur gelben (119 km/h) Stufe an und sinkt dann wieder ab (117 km/h) (Abbildung 36).

Die maximale Geschwindigkeit steigt zwischen den wachen (grün, 129 km/h) und mittel müden Fahrern (gelb, 134 km/h) signifikant (Abbildung 36) an.

Für die Standardabweichung der Geschwindigkeit ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen der grünen (10.9 km/h) und gelben (5.8 km/h) Müdigkeitsstufe (Abbildung 37), wobei es hier zu einer Verringerung der Geschwindigkeit mit zunehmender Müdigkeit kommt.

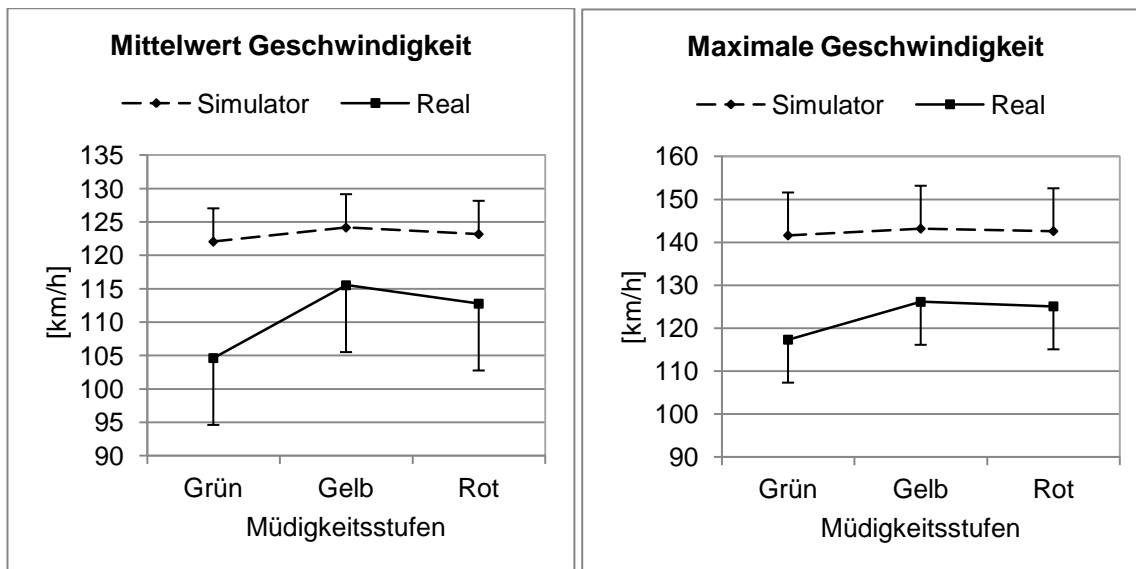


Abbildung 36: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

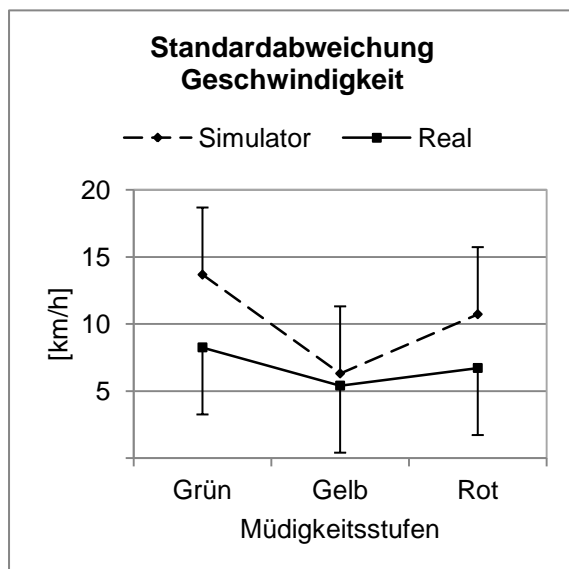


Abbildung 37: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Die Interaktion für die mittlere Geschwindigkeit zeigt folgendes Bild: In der simulierten Fahrumgebung kommt es von der grünen (122 km/h) zur gelben (124 km/h) Müdigkeitsstufe zu einer signifikanten Erhöhung der Geschwindigkeit. Unter realen Fahrbedingungen findet sich dieser Effekt auch, dort zeigt sich zusätzlich ein tendenzieller Anstieg der Geschwindigkeit von grün (104 km/h) zu rot (112 km/h) und ein tendenzielles Absinken der Geschwindigkeit von gelb (115 km/h) zu rot und somit ein umgekehrt U-förmiger Verlauf.

Für die maximale Geschwindigkeit zeigt sich, dass sich die drei Müdigkeitsstufen im Simulator nicht signifikant unterscheiden. In der Realbedingung findet sich ein signifikanter Anstieg der Geschwindigkeit von der grünen (117 km/h) zur gelben (126 km/h) Müdigkeitsstufe.

Insgesamt zeigt sich für die Geschwindigkeitsparameter, dass mit zunehmender Müdigkeit die Geschwindigkeit erhöht wird, sich jedoch die Varianz verringert. Zudem unterscheiden sich auch die beiden Fahrumgebungen, wobei in der Simulation grundsätzlich eine höhere Geschwindigkeit gefahren wird und auch die Varianz höher ausfällt.

Im Geschwindigkeitsverhalten zeigt sich das Kompensationsverhalten der Fahrer recht gut. Hier wird versucht, durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit die Aufgabenschwierigkeit zu steigern. Zudem ist zu beobachten, dass trotz gleicher Geschwindigkeitsinstruktion, im Simulator durchwegs schneller gefahren wird. Der Grund ist hier wahrscheinlich in der fehlenden Rückmeldung, aber auch in den nicht vorhandenen Konsequenzen für ein zu schnelles Fahren zu sehen.

4.3.5 Diskussion abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens

Im theoretischen Teil konnte bereits aufgezeigt werden, dass in der Literatur kaum einheitliche Fahrparameter für die Unterscheidung von Müdigkeit zu finden sind. Der Hintergrund dieser ersten Analyse war es demnach, jene Parameter zu identifizieren, die sensitiv auf Müdigkeit reagieren.

Ebenfalls finden sich in den bisher veröffentlichten Studien Widersprüche bezüglich des Verlaufs der Müdigkeit in der Fahrsimulation sowie in der realen Verkehrsumgebung. Aus diesem Grund wurde in dieser ersten Analyse zusätzlich beide Fahrumgebungen (Real vs. Simulator) verglichen, um Aussagen darüber treffen zu können, ob Parameter vorhanden sind, die in beiden Umwelten gleich auf Müdigkeit reagieren.

Zudem wurde durch die Zusammenlegung der vier Studien und der Extraktion von Teilnehmern, die in sämtlichen Müdigkeitsstufen vertreten waren auch überprüft, ob sich das Fahrverhalten von einem wachen Fahrer im Vergleich zu jenem eines müden Fahrers unterscheiden lässt. Dieser Ansatz wurde gewählt, da die derzeit am Markt befindlichen Systeme die Daten nach dem gleichen Prinzip verrechnen. In diesem Abschnitt sollen daher die gefundenen Ergebnisse der Messwiederholungsanalyse hinsichtlich der Autobahnfahrten diskutiert werden.

Die Gliederung der Diskussion erfolgt in gleicher Weise wie die Ergebnispräsentation (Lenkaktivität, Spurhaltung, Geschwindigkeitsverhalten).

Grundsätzlich lässt sich auf Grund der Ergebnisse feststellen, dass Müdigkeit das Fahrverhalten verändert. Es zeigt sich jedoch, dass es je nach untersuchtem Fahrparameter zu unterschiedlichen Auswirkungen von Müdigkeit kommt.

Lenkverhalten

Als erste Parameter wurden Veränderungen im Lenkradwinkel untersucht, da davon ausgegangen wurde, dass das Lenkverhalten als „direkteste“ Interaktion mit dem Fahrzeug zu werten ist und sensitiv auf Müdigkeit reagiert. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Literatur, so stellt die Veränderung im Lenkradwinkel eine der am häufigsten verwendeten Parameter für die Müdigkeitsdetektion dar (Kapitel 2.6.1). In diesem Kontext wird jedoch meist die Steering-Wheel-Reversal-Rate (SWRR) oder auch das Time-Still-Kriterium verwendet. In dieser Untersuchung wurden diese Verfahren nicht eingesetzt da hierfür vorab Grenzwerte festgelegt werden

müssen. Hier wurden die Grenzen für das Fahrverhalten durch die Müdigkeitseinteilung auf Grundlage der Fremdreferenzierung durchgeführt. Für die Erfassung der Müdigkeitsauswirkungen wurden hier die Standardabweichung sowie der maximale Lenkradwinkelausschlag verwendet.

Beide Parameter sind auf der Stabilisierungsebene angesiedelt, da sie primär dafür verwendet werden, dass Fahrzeug in der Spur zu halten.

Betrachtet man den Verlauf der Parameter über Müdigkeit hinweg, so zeigt sich in der Standardabweichung des Lenkradwinkelsignals, dass es mit zunehmender Müdigkeit zu einer Abnahme kommt, dieser Wert vom mittel zu stark müde jedoch wieder ansteigt. Dieser Verlauf deckt sich gut mit den in der Literatur vorherrschenden Ergebnissen, die aussagen, dass mit zunehmender Müdigkeit eine Verringerung der motorischen Aktivität zu beobachten ist (Williamson et al., 2001). Der Anstieg nach dem ersten Abfall der Werte ist schwieriger zu erklären. Bezieht man die Ergebnisse auf das Modell von Schmidtke (1965) bzw. auf das erweiterte Müdigkeitsmodell (Abbildung 2), welches eine Kompensation im Verlauf der Müdigkeit postuliert, so könnten man den Wiederanstieg nach dem ersten Abfall als Kompensation auf die Müdigkeit ansehen.

Interessant ist das Ergebnis, dass sowohl die Standardabweichung als auch der absolut größte Lenkradwinkel in der Fahrsimulation größer waren als in der realen Umwelt. Erwartet hätte man den umgekehrten Effekt, zumindest für die Standardabweichung, da in der realen Fahrumgebung ständig Korrekturen auf Grund der Straßenbeschaffenheit vorgenommen werden müssen. Eine mögliche Erklärung warum beide Parameter in der Simulation größere Werte einnehmen wäre, dass die Lenkung im Fahrimulator sehr indirekt ist und in der Simulation dadurch erst größere Lenkradwinkel für den Fahrer sichtbar werden. Möglicherweise müssen Fahrer in einer simulierten Fahrumgebung also ein ausgeprägtes Bedienverhalten zeigen, um die fehlenden haptischen Rückmeldungen im Simulator auszugleichen.

Spurhaltung

Weitere untersuchte und analysierte Parameter waren die der Spurhaltung. Diese werden zwar über Stabilisierungsmaßnahmen durch Lenkrad- und Gas/Bremspedalbetätigung gesteuert, sind jedoch auch als Aufgabe „Fahrspur folgen“ auf der Führungsebene anzuordnen.

Hinsichtlich der Spurhaltung zeigt sich, dass sich ein Kompensationsverhalten, wie es auf der Stabilisierungsebene zu finden ist, nicht nachweisen lässt.

Es zeigt sich hier ein Verhalten, dass durchaus als kritisch im Hinblick auf die Verkehrssicherheit zu betrachten ist. Fahrer verringern mit zunehmender Müdigkeit den zeitlichen Abstand zur rechten Spurmarkierung (TLC). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Unfällen, die in den Statistiken berichtet werden. Dort zeigt sich, dass die meisten Müdigkeitsunfälle durch ein Verlassen der Fahrbahn über den rechten Rand hinweg zustande kommen. Die Verringerung der TLC wäre ein Hinweis dafür. Die Zeit der Fahrer zur Spurüberschreitung verringert sich demnach, und sie halten sich länger in (TDLC; Zeit < 10 cm zum rechten Rand) einem engen Bereich nahe der rechten Spurmarkierung auf. Dies hat zur Folge, dass es zu Korrekturausschlägen (größerer Lenkradwinkel) nach links kommt, um das Fahrzeug (Absolute Abwei-

chung vom rechten Rand) in der Spur zu halten. Daraus ergeben sich mit zunehmender Müdigkeit als Konsequenz auch höhere Schwankungen um den rechten Rand. Doch warum zeigen Fahrer dieses Verhalten? Hierfür könnte eine nachlassende Konzentrationsfähigkeit ebenso verantwortlich sein wie auch eine Reduktion der mentalen Fähigkeiten, um den Abstand zum Rand über das visuelle System zu schätzen. Durch die langsamere Verarbeitung der eingehenden visuellen Informationen lassen sich auch die erhöhten Schwankungen gut erklären, da mit zunehmender Müdigkeit erst spät bemerkt wird, dass man sich schon sehr nah am rechten Rand befindet.

Eine weitere Erklärung wäre, dass Fahrer aus Sicherheitsgründen in müden Zustand weiter links fahren (nicht signifikant) diese Tendenz jedoch immer wieder durch erhöhte Lenkbewegungen nach rechts wieder ausgleichen. So erhält man auch eine Erklärung für die zuvor gefundene erhöhte Standardabweichung des Lenkradwinkels bei sehr starker Müdigkeit.

Für die Fahrumgebung ergeben sich auch in den Spurhaltemaßen eindeutige Unterschiede zwischen der realen Straße und dem Fahrsimulator. Wie zu erwarten, fahren die Personen in der realen Fahrumgebung mehr in der Spurmitte. Dieses Ergebnis lässt sich gut nachvollziehen, da durch den größeren Abstand zu den Fahrspurgrenzen eine Art „Sicherheitsabstand“ eingehalten werden kann. Aus dieser Sicht müsste die Schwankung um die gewählte Idealspur im Realverkehr geringer ausfallen. Dieses Ergebnis zeigt sich auch, und spiegelt somit auch hier den Sicherheitsaspekt wieder. Der gleiche Erklärungsansatz ist auch für das Befahren des 10 cm-Abschnitts anzunehmen, da es hier vor allem in der Realfahrt durchaus bereits zu kritischen Situationen kommen kann, wenn man sich in diesem Bereich am rechten Ende der Fahrspur bewegt (z.B. durch Pannenfahrzeuge am Standstreifen).

Geschwindigkeitsverhalten

Ein weiterer analysierter Parameter war die Geschwindigkeit. Müdigkeit anhand des Geschwindigkeitsverhaltens zu erkennen, stellt eine große Herausforderung dar. Gerade diese Variable ist extrem durch äußere Bedingungen beeinflusst. Straßentyp, Verkehrsdichte, Sichtverhältnisse, all dies hat einen maßgeblichen Effekt auf die Geschwindigkeitswahl. Bekannt ist auch, dass sich in der Geschwindigkeit bewusste Kompensationsstrategien von Fahrern zeigen, indem Sie z.B. langsamer fahren, wenn sie eine fahrirrelevante Nebentätigkeit ausführen (Muhrer, 2011), um die Aufgabenschwierigkeit auszugleichen. Da sich in einigen Studien (Fairclough und Graham, 1999; Lenné, Triggs und Redman, 1998) zeigt, dass Fahrer mit zunehmender Müdigkeit versuchen, durch erhöhte Aktivität den Zustand zu kompensieren, war von Interesse, ob sich dies auch im Geschwindigkeitsverhalten abbilden lässt.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich Müdigkeit im Geschwindigkeitsverhalten zeigt.

Mit zunehmender Müdigkeit erhöhte sich die mittlere als auch die maximale Geschwindigkeit. Ein Grund dafür könnte sein, dass sich durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit auch die Anforderungen der Fahraufgabe an den Fahrer erhöhen, und die Fahrer sich dadurch zu aktivieren versuchten. Eine andere Möglichkeit kann sein, dass Fahrer ihre Geschwindigkeit bewusst erhöhten, da Sie so den Versuch früher

beenden konnten. Allerdings lässt sich dadurch die gefundene Veränderung in der Geschwindigkeitsschwankung nicht erklären. Im Vergleich zu vielen Untersuchungen in der Literatur (Baulk et al., 2008; Fairclough et al., 1999), die ein Ansteigen der Standardabweichung der Geschwindigkeit berichten, fällt diese in dieser Untersuchung mit zunehmender Müdigkeit ab. Eine Erklärung dafür wäre, dass die Geschwindigkeitsvarianz sehr von der Gaspedalbetätigung abhängig ist. Diese Betätigung ist auf der Stabilisierungsebene angesiedelt, und in einigen Untersuchungen findet man Einbußen in den motorischen Fähigkeiten (Caraty & Montacié, 2012; Ting, Hwang, Doong, & Jeng, 2008; Williamson et al., 2001) der Fahrer, die sich unmittelbar in der Gaspedalbedienung widerspiegeln könnte. So könnte dies der Grund sein, warum die Geschwindigkeitsschwankung mit zunehmender Müdigkeit geringer wird. Die Personen regulieren ihre Geschwindigkeit weniger, was sich auch mit der zunehmenden Maximalgeschwindigkeit deckt.

Hinsichtlich der Unterschiede zwischen den beiden Fahrumgebungen zeigte sich, dass in der Simulation eine höhere Geschwindigkeit gefahren wurde, obwohl in beiden Bedingungen die gleiche Geschwindigkeitsvorgabe gegeben wurde.

Der Grund dafür könnte sein, dass in der Realfahrt die Fahrten auf öffentlichen Straßen stattgefunden haben und somit auch zusätzlicher Verkehr vorhanden war, der die Geschwindigkeit der Fahrer natürlich beeinflusst haben könnte. So kann im Simulator eine Geschwindigkeitsvorgabe konstant eingehalten werden, in der Realfahrt jedoch kaum, was die geringeren Mittelwerte im Realverkehr erklären kann. Ein interessantes Ergebnis ist auch, dass die Standardabweichung der Geschwindigkeit im Simulator signifikant höher war als im Realverkehr, jedoch nur, wenn die Fahrer wach waren. Grund hierfür könnte sein, dass die wachen Fahrer sich entweder erst noch an den Fahrsimulator gewöhnen oder durch die Schwankungen versuchen der Monotonie der Simulatorfahrt entgegen zu wirken. Möglicherweise verlieren diese Unterschiede ihr Gewicht, wenn die unbewusste, motorische Aktivität geringer wird. Das bedeutet, würde man ein System entwickeln, dass nur sehr starke Müdigkeit detektieren soll, ist es hinsichtlich der Geschwindigkeitsvarianz unerheblich, ob das System im Simulator oder im Realverkehr entwickelt wurde. Dies gilt allerdings nicht für die mittlere und maximale Geschwindigkeit.

Insgesamt lässt sich für die Fahrparameter folgendes festhalten: Die Fahrer versuchen die Müdigkeit, die im Laufe der Untersuchung einsetzt – bewusst oder unbewusst - zu kompensieren (vgl. Schmidtke, 1965; Schmidt, 2010; Abbildung 2). Diese Kompensation bezieht sich hierbei auf zwei Aspekte:

- (1) Versuch, das eigene Aktivierungslevel durch Erschwerung der Fahraufgabe (z.B. höhere Geschwindigkeiten) zu steigern.
- (2) Versuch, die Fahrsicherheit durch eine veränderte Spurführung (z.B. stärkeres Linksfahren) zu erhöhen.

Beide Aspekte münden in ein gefährlicheres Fahrverhalten unter Müdigkeit, da ein Abkommen von der Spur bei hohen Geschwindigkeiten bei einem typischen Müdigkeitsunfällen häufig zu finden ist (siehe Kapitel 2.1).

Nachdem nun die Auswirkungen von Müdigkeit auf die einzelnen Fahrparameter besprochen wurden, soll zusammenfassend ein Bild eines müden Fahrers erstellt werden.

Für den Fahrer, der unter Müdigkeit ein Fahrzeug lenkt, lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen folgendes Bild generieren. Wie sich gezeigt hat, finden sich im Fahrverhalten vorrangig zwischen wachen Fahrern (grün) und Fahrern in den nachfolgenden Müdigkeitsstufen (gelb und rot) Unterschiede. Unterschiede zwischen etwas müden (gelb) und sehr müden (rot) Fahrern finden sich jedoch nur selten. Mögliche Gründe hierfür könnten sein:

(1) Bereits ab der gelben Müdigkeitsstufe wird ein Verhalten gezeigt, welches sich bei zunehmender Müdigkeit kaum bzw. nicht mehr verändert. Dies würde sich auch damit gut begründen lassen, da in vielen Parametern ein annähernd U-förmiger Verlauf zu finden ist.

(2) Die Zuordnung der Verhaltensweisen zu den Müdigkeitsstufen ist in den höheren Müdigkeitsbereichen zu wenig differenziert. Betrachtet man die objektiven Kriterien, die zur Einteilung in die jeweilige Müdigkeitsstufe führen und stellt den Vergleich mit der subjektiven Selbstreferenzierung der Müdigkeit an, so ist dieser Einwand jedoch kaum haltbar. Zum einen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Referenzierungsverfahren (Kapitel 4.2), zum anderen sind die objektiven Müdigkeitsanzeichen die zur Müdigkeitsstufe führen durchaus gut erkenn- und erklärbar.

(3) Die erreichten Müdigkeitswerte und somit die Müdigkeitsauswirkungen waren zu gering. Wie sich in der Literatur zeigt, werden Müdigkeitsstudien sehr oft mit Probanden durchgeführt, die vom Schlaf abgehalten wurden bzw. an einer Schlafstörung leiden. Es zeigt sich weiter, dass es selbst in diesen Untersuchungen nicht immer eindeutige Verhaltensänderungen aufgrund von Müdigkeit gibt. Da in vorliegender Untersuchung keine Schlafdeprivation durchgeführt wurde und auch keine klinischen Schlafstörungen vorlagen wurden auch nicht die absolut höchsten Müdigkeitswerte erreicht. Möglicherweise wären bei einer längeren Untersuchungsdauer weitere Verhaltensänderungen eingetreten. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der Müdigkeitsverläufe. Dort zeigte sich, dass zwischen den letzten Messungen kaum noch Veränderungen in der Höhe der Müdigkeitswerte beobachtet werden konnten.

(4) Die Daten wurden abhängig analysiert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass der individuelle Einfluss konstant bleibt. Sieht man sich jedoch die Abbildungen zu den einzelnen Parametern an, so zeigen sich trotz dieses Vorgehens immer noch sehr große Schwankungen. Diese könnten auch dafür verantwortlich sein, dass eine Unterscheidung zwischen der gelben und roten Müdigkeitsstufe nur schwer möglich ist.

Die in diesem Kapitel beschriebene Analyse verfolgt das Ziel, Variablen zu identifizieren, die sensitiv auf Müdigkeit reagieren. Zudem sollte durch die Durchführung einer abhängigen Analyse sichergestellt werden, dass Aussagen über Müdigkeitsauswirkungen in ihrer „Reinform“ getroffen werden können. Da es auch Ziel der Arbeit ist, Variablen zu identifizieren die Müdigkeitsauswirkungen personenunabhängig abbilden können, wurde der gleiche Datensatz unabhängig verrechnet.

4.4 Unabhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens (Autobahn)

In dieser Analyse werden die gleichen Daten, welche auch in der abhängigen Messung verwendet wurden (Kapitel 4.3) nochmals unabhängig verrechnet. D.h. jeder Müdigkeitswert geht als Einzelwert in die Berechnung ein. Berechnet wurde für jeden Fahrparametercluster (Lenkradwinkel, Spurhaltung und Geschwindigkeit) jeweils eine 2x3 (2 Simulator/Real x 3 Müdigkeitsstufen) MANOVA. Das dadurch entstandene Studiendesign sowie die Zellenbesetzung in den einzelnen Versuchsbedingungen sind aus Tabelle 29 ersichtlich.

In diesen Analysen muss ein weiterer Aspekt betrachtet werden, der bei der Innersubjektanalyse nicht relevant war, die Messqualität. In beiden Realfahrtstudien ergaben sich aufgrund der eingeschränkten Spurerkennung Ausfälle an Messdaten. Der Grund für die Verringerung lag in der schlechten Qualität der Spurmarkierungen auf der Autobahn sowie in der ungenauen Erkennung der Spurmarkierung durch das im Fahrzeug verbaute System. Kriterium für die Aufnahme von Daten in die Analysen war, dass mindestens zwei Minuten valider Messdaten pro 10-Minutenabschnitt vorhanden sein mussten. Diese Einschränkung trifft nur für die Spurhaltemaße zu. Für die Geschwindigkeits- und Lenkwinkelmaße wurden keine Einschränkungen getroffen, da diese immer vorhanden waren. Für den Simulator ist ebenfalls keine Einschränkung vorhanden, da es hier zu keinen Ausfällen in den Daten kam.

Diese Kontrolle von validen Daten war für die abhängige Messung nicht notwendig. Dort ergaben sich durch das Zusammenfassen der Messwerte eines Fahrers in der jeweiligen Müdigkeitsstufe immer mindestens zwei Minuten valider Messdaten.

Bevor nun die durchgeführten Berechnungen dargestellt werden, soll für die Realfahrtstudien aufgezeigt werden, wie sich die Anzahl an 10-Minutenabschnitten auf der Autobahn in Abhängigkeit der Datenqualität verringerte (Tabelle 29).

Tabelle 29: Studiendesign und Anzahl an Müdigkeitsstufen für die Autobahn in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

| | | Müdigkeitsstufe | | | |
|--------------|-----------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | Grün | Gelb | Rot | Σ |
| Fahrumgebung | Simulator | 32 | 69 | 51 | 152 |
| | Real | 25 (37) | 119 (121) | 65(66) | 209 (224) |
| Σ | | 57 (69) | 188 (190) | 116 (117) | 361 (376) |

Anmerkung: Werte in Klammern sind vorhandene Daten ohne Berücksichtigung der Datenqualität.

Es zeigt sich eine geringfügige Verringerung der Anzahl an Müdigkeitsstufen in der realen Fahrumgebung (Tabelle 29) aufgrund der geforderten Datenqualität, wobei sich in der grünen Müdigkeitsstufe der prozentuell größte Verlust ergibt. Erwartungsgemäß ergibt sich für den Fahrsimulator keine Reduzierung der Messdaten. Für die folgenden Berechnungen wurden grundsätzlich die Daten in den Klammern verwendet. Nur für die Berechnungen welche Spurhaltungsparameter (z.B. TLC) beinhalten, werden die verringerten Datensätze (ohne Klammer) verwendet.

4.4.1 Ergebnisse Fahrverhalten

4.4.1.1 Lenkverhalten

Als Parameter des Lenkradwinkels wurden wiederum der mittlere und absolute Lenkradwinkel herangezogen. Zwischen den beiden Fahrumgebungen findet sich ein signifikanter Unterschied im Lenkverhalten. Zudem unterscheidet sich der Lenkradwinkel zwischen den drei Müdigkeitsstufen ebenfalls signifikant und es liegt eine signifikante Interaktionen vor (Tabelle 30).

Tabelle 30: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Lenkradwinkel | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 411.52 | 2/362 | .000* | .695 |
| HE Müdigkeitsstufe | 3.88 | 4/724 | .004* | .021 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 4.53 | 4/724 | .001* | .024 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 779.36 | 1/363 | .000* | .682 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 96.89 | 1/363 | .000* | .211 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 6.45 | 2/363 | .002* | .034 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 4.23 | 2/363 | .015* | .023 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 2.40 | 2/363 | .091 | .013 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 3.00 | 2/363 | .051 | .016 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Für die Standardabweichung (1.3° vs. 2.9°) des Lenkradwinkels sowie für den absoluten (4.8° vs. 11.9°) Lenkradwinkel zeigt sich, dass beide Parameter in der realen Fahrumgebung im Vergleich zur Simulation signifikant geringer ausfallen (Abbildung 38).

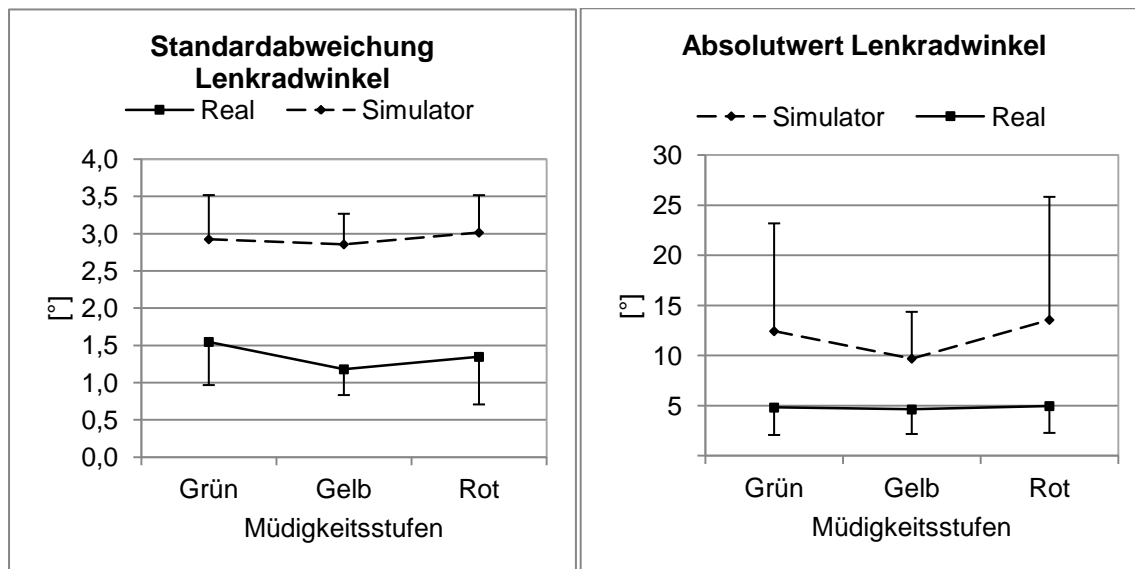


Abbildung 38: Standardabweichung und absoluter Lenkwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Hinsichtlich der Müdigkeitsstufen ergibt sich unabhängig der Fahrumgebung für die Standardabweichung eine signifikante Verringerung von grün (2.2°) zu gelb (2.0°) sowie ein Anstieg von gelb zu rot (2.1°). Des Weiteren findet sich ein signifikanter Anstieg im absoluten Lenkwinkel von gelb (7.1°) zu rot (9.2°), unabhängig von der Fahrumgebung.

Bezüglich der Interaktion zeigen sich bei den paarweisen Vergleichen keine signifikanten Ergebnisse.

Für die Lenkwinkelmaße ergibt sich insgesamt betrachtet, dass beide Parameter in der Simulation jeweils höher ausfallen. In Bezug auf eine steigende Müdigkeit zeigt sich ein U-förmiger Verlauf für die Standardabweichung des Lenkwinkels sowie ein Anstieg im absoluten Lenkwinkel von gelb zu rot unabhängig der Fahrumgebung. Somit zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie in der abhängigen Messung. Auch dort wurde beobachtet, dass in der Realität die Lenkaktivität geringer ausfällt. Ebenso findet sich der Effekt wieder, dass wache Fahrer eine höhere Lenkaktivität zeigen als müde Fahrer dies tun. Somit ist auch in der Zwischensubjektbetrachtung die Abnahme der motorischen Aktivität zu beobachten.

4.4.1.2 Spurhaltung

Im nächsten Auswertungsschritt wurden die Spurhaltemaße unabhängig analysiert. Die verwendeten Parameter und Berechnungen wurden bereits vorgestellt.

Da es bei den Spurhaltemaßen Einschränkungen in der Messqualität gab, wird für die genaue Anzahl an verrechneten Müdigkeitsstufen auf Tabelle 29 verwiesen.

Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Spurhaltemaßen zwischen den beiden Fahrumgebungen. Zudem findet sich ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Müdigkeitsstufen sowie eine signifikante Interaktion (Tabelle 31).

Tabelle 31: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Spurhaltung | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 125.22 | 4/352 | .000* | .587 |
| HE Müdigkeitsstufe | 5.40 | 8/704 | .000* | .058 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 5.73 | 8/704 | .000* | .061 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 41.82 | 1/355 | .000* | .105 |
| Standardabweichung rechter Rand | 31.86 | 1/355 | .000* | .082 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 0.651 | 1/355 | .420 | .002 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 82.82 | 1/355 | .002* | .189 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 0.38 | 2/355 | .681 | .002 |
| Standardabweichung rechter Rand | 0.27 | 2/355 | .760 | .002 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 6.40 | 2/355 | .002* | .035 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 3.14 | 2/355 | .044* | .017 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 1.31 | 2/355 | .270 | .007 |
| Standardabweichung rechter Rand | 1.56 | 2/355 | .212 | .009 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 19.95 | 2/355 | .000* | .101 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 2.45 | 2/355 | .088 | .014 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Univariat zeigt sich für den Haupteffekt Fahrumgebung folgendes Bild: Der mittlere Abstand zum rechten Rand ist in der realen Fahrumgebung (.93 m) größer als im Simulator (.72 m) (Abbildung 39). Der umgekehrte Effekt zeigt sich für die Standardabweichung (Sim: .42 m vs. Real: .31 m) und der prozentuellen Zeit < 10 cm zum rechten Rand (Sim: 7.8 % vs. Real: 1.3 %) (TDLC). Diese Variablen nehmen in der Simulation größer Werte an als in der Realität (Abbildung 39, Abbildung 40).

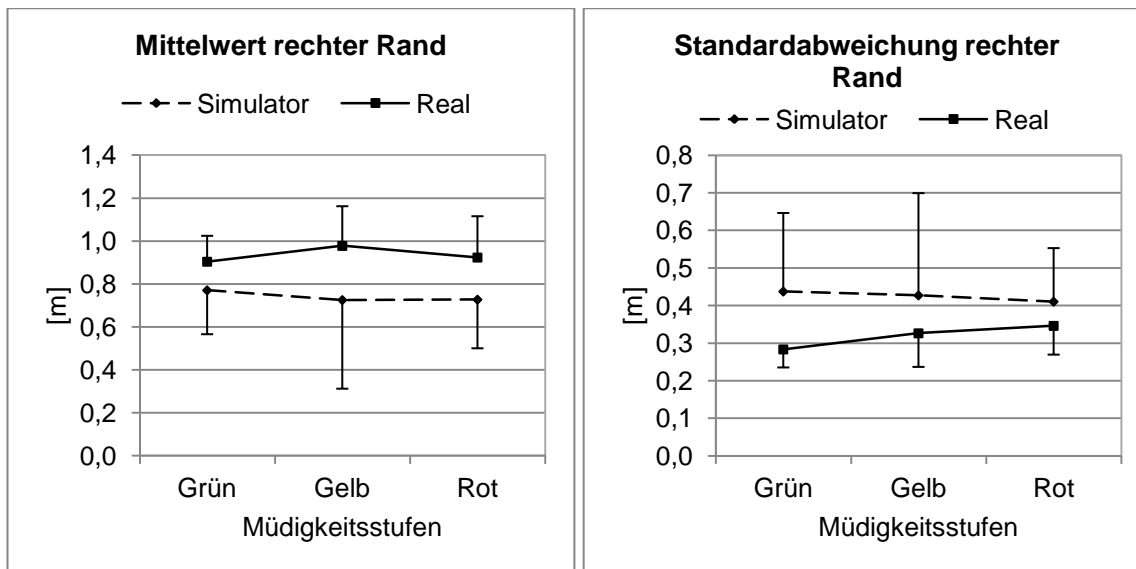


Abbildung 39: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

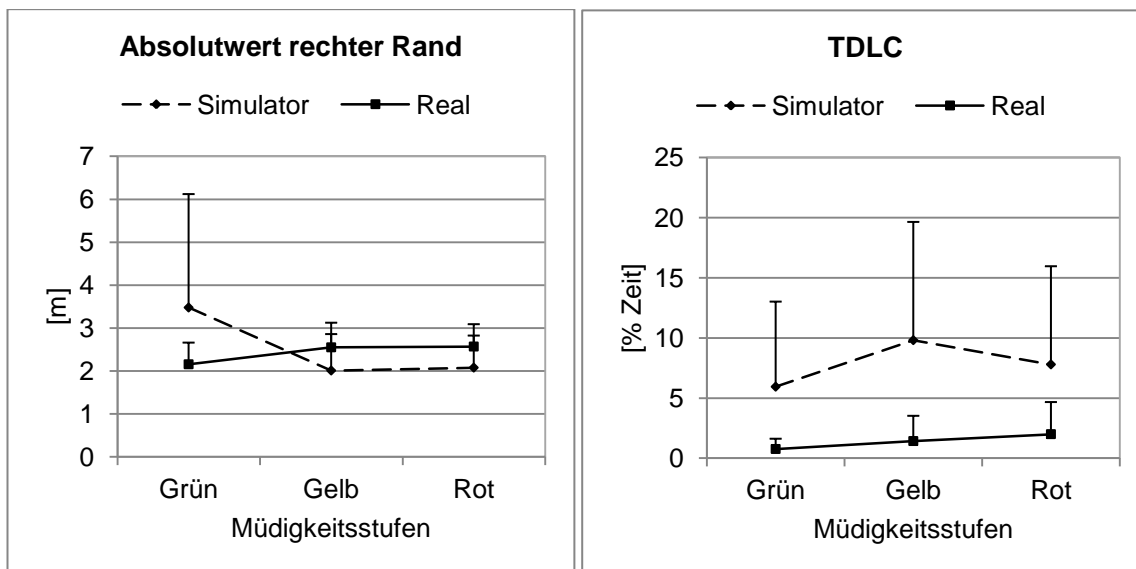


Abbildung 40: Absolute Abweichung vom rechten Rand und Zeit in Prozent <10 cm zum rechten Rand (TDLC) in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Bei der absoluten Abweichung vom rechten Rand unterscheiden sich die Fahrumgebungen nur in der grünen Stufe, wobei hier der Wert in der Realität geringer ausfällt (2.1 m vs. 3.4 m). Zudem zeigt sich für die absolute Abweichung vom rechten Rand, dass es unter der realen Bedingung zu einer Zunahme von grün (2.1 m) zu gelb (2.4 m) und grün zu rot (2.3 m) kommt, wohingegen in der Simulation eine Abnahme zwischen grün (3.4 m) und gelb (2.0 m) sowie grün und rot (2.0 m) zu beobachten ist. Des Weiteren zeigt sich, dass für die TDLC nur unter der realen Fahrbedingung ein tendenzieller Anstieg von den wachen (grün, .7 %) zu den müden (gelb, 1.4 %) Fahrern vorliegt.

Für die Spurhaltung zeigt sich insgesamt, dass im realen Straßenverkehr mehr in der Mitte der Spur gefahren wird als im Simulator, zudem schwanken die Personen um diese gewählte Linie in der Realität weniger. Die Müdigkeitsauswirkungen stellen

sich teilweise gegenläufig dar. So steigt die absolute Abweichung zum rechten Rand in der Realität mit zunehmender Müdigkeit, wohingegen in der Simulation genau der gegenteilige Effekt zu beobachten ist. Auch hier zeigt sich wieder ein sehr ähnliches Verhalten wie auch in der abhängigen Messung. Das sichere Fahrverhalten der Fahrer bleibt auch in der Zwischensubjektanalyse in der Realität bestehen. Anders stellt sich hingegen der Verlauf der Standardabweichung in der Simulation dar. Während in der vorigen Analyse ein leichter Anstieg mit zunehmender Müdigkeit zu finden war, zeigt sich hier ein Absinken. Hierfür kann die größere Varianz in dieser Analyse verantwortlich gemacht werden.

4.4.1.3 Time to Line Crossing (TLC)

Als letzter Spurparameter wurde wieder Mittelwert und Standardabweichung der TLC betrachtet. Die oben getroffenen Einschränkungen hinsichtlich der Messqualität gelten auch hier wieder.

Es zeigen sich für die Fahrumgebung und die Müdigkeitsstufen signifikante Effekte. Ebenso finden sich signifikante Interaktionen der beiden Variablen (Tabelle 32).

Tabelle 32: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Spurhaltung | F | df | p | η^2 |
|--|---------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 1337.36 | 2/354 | .000* | .883 |
| HE Müdigkeitsstufe | 2.99 | 4/708 | .018* | .017 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 2.67 | 4/708 | .031* | .015 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 248.99 | 1/355 | .000* | .412 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 2434.35 | 1/355 | .000* | .873 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 3.53 | 2/355 | .030* | .020 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 4.82 | 2/355 | .009* | .026 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 1.88 | 2/355 | .153 | .011 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 0.56 | 2/355 | .568 | .003 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Für den Haupteffekt Fahrumgebung zeigt sich in der Realfahrt eine signifikant höhere mittlere TLC (2.0 sek) als in der simulierten Fahrumgebung (1.7 sek) (Abbildung 41). Die Standardabweichung zeigt hingegen in der Simulation (.79 sek) signifikant höhere Werte als in der Realität (.15 sek) (Abbildung 41).

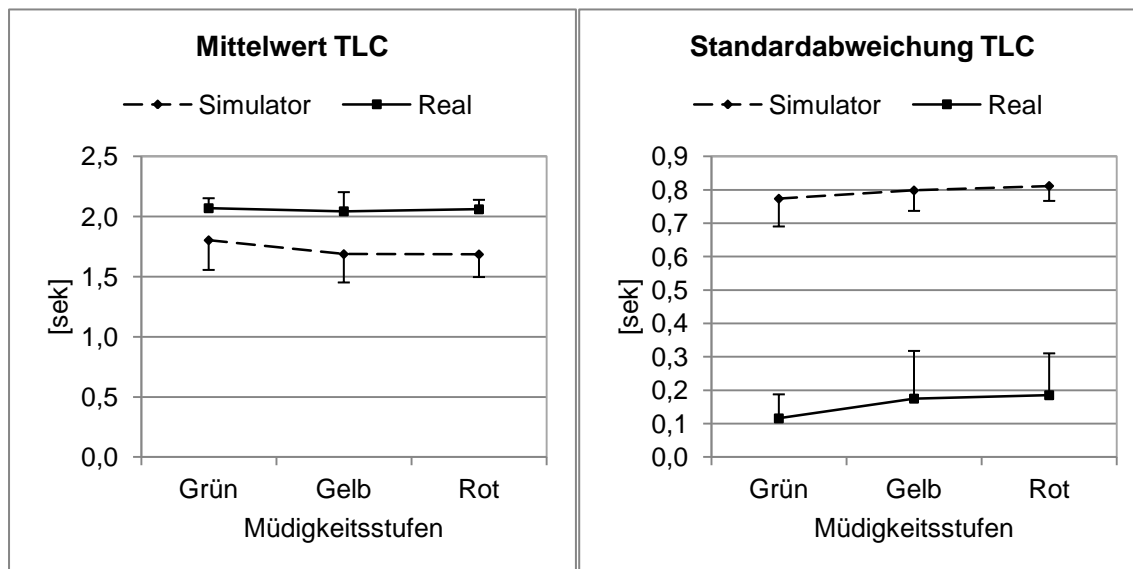


Abbildung 41: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Für den Haupteffekt Müdigkeitsstufe zeigt sich folgendes Bild. Von der grünen (1.93 sek) zur gelben (1.86 sek) Müdigkeitsstufe kommt es zu einer signifikanten Verringerung der mittleren TLC. Tendenziell kann dieser Effekt zwischen der grünen und roten (1.87 sek) Stufe für die mittlere TLC beobachtet werden. Der gegenteilige Effekt, nämlich ein signifikanter Anstieg kann für die Standardabweichung der TLC zwischen der grünen (.44 sek) und gelben (.48 sek) sowie der grünen und roten (.49 sek) Stufe gezeigt werden.

Somit zeigt sich für die TLC, dass in der Realität größere zeitliche Abstände zum rechten Rand im Vergleich zur Simulation gehalten werden. Zudem schwanken die Fahrer in der Realität weniger als im Simulator. Der Müdigkeitseffekt kommt hier nur geringfügig zum Tragen, wobei sich nur die wachen von den müden bzw. sehr müden Fahrer unterscheiden. Unterschiede zwischen den müden (gelb) und sehr müden (rot) Fahrern können nicht beobachtet werden. Somit verhält sich dieser Parameter sehr ähnlich wie in der abhängigen Analyse. Auch dort war es nicht möglich zwischen den höheren Müdigkeitsgraden zu unterscheiden. Dies könnte daran liegen, dass die Dauer des Versuches zu kurz war, damit sich die Auswirkungen noch deutlicher im Fahrverhalten zeigen konnten.

4.4.1.4 Geschwindigkeitsverhalten

Für die Berechnungen zur Prüfung der Effekte von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufen wurden wieder die gleichen Geschwindigkeitsparameter verwendet wie in der abhängigen Messung (Kapitel 4.3.4.4)

Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt für die Fahrumgebung sowie für die Müdigkeitsstufen. Ebenso findet sich eine signifikante Interaktion (Tabelle 33).

Tabelle 33: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Geschwindigkeit | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 110.99 | 3/361 | .000* | .480 |
| HE Müdigkeitsstufe | 15.23 | 6/722 | .000* | .112 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 7.80 | 6/722 | .000* | .061 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 195.38 | 1/363 | .000* | .350 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 14.11 | 1/363 | .000* | .037 |
| Maximale Geschwindigkeit | 332.19 | 1/363 | .000* | .478 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 18.54 | 2/363 | .000* | .093 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 25.09 | 2/363 | .000* | .121 |
| Maximale Geschwindigkeit | 10.06 | 2/363 | .000* | .053 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 7.37 | 2/363 | .001* | .039 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 9.88 | 2/363 | .000* | .052 |
| Maximale Geschwindigkeit | 4.98 | 2/363 | .007* | .027 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Univariat betrachtet unterscheiden sich die mittlere und maximale Geschwindigkeit sowie die Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung signifikant, wobei unter realen Fahrbedingungen die Geschwindigkeiten geringer ausfallen (MW: 112 km/h vs. 122 km/h; MAX: 123 km/h vs. 141 km/h; SD: 6.2 km/h vs. 7.7 km/h).

Für den Haupteffekt Müdigkeit zeigt sich für die maximale Geschwindigkeit ein signifikanter Anstieg der Geschwindigkeit von der grünen (129 km/h) zur gelben (134 km/h) und von der grünen zur roten (134 km/h) Müdigkeitsstufe (Abbildung 42). Das gleiche Bild zeigt sich auch für die mittlere Geschwindigkeit (grün: 113 km/h, gelb und rot 119 km/h). Bei der Standardabweichung der Geschwindigkeit verhält es sich genau umgekehrt. Hier findet sich eine signifikante Verringerung von der grünen (9.1 km/h) zur gelben (5.6 km/h) und von der grünen zur roten (6.3 km/h) Stufe (Abbildung 43).

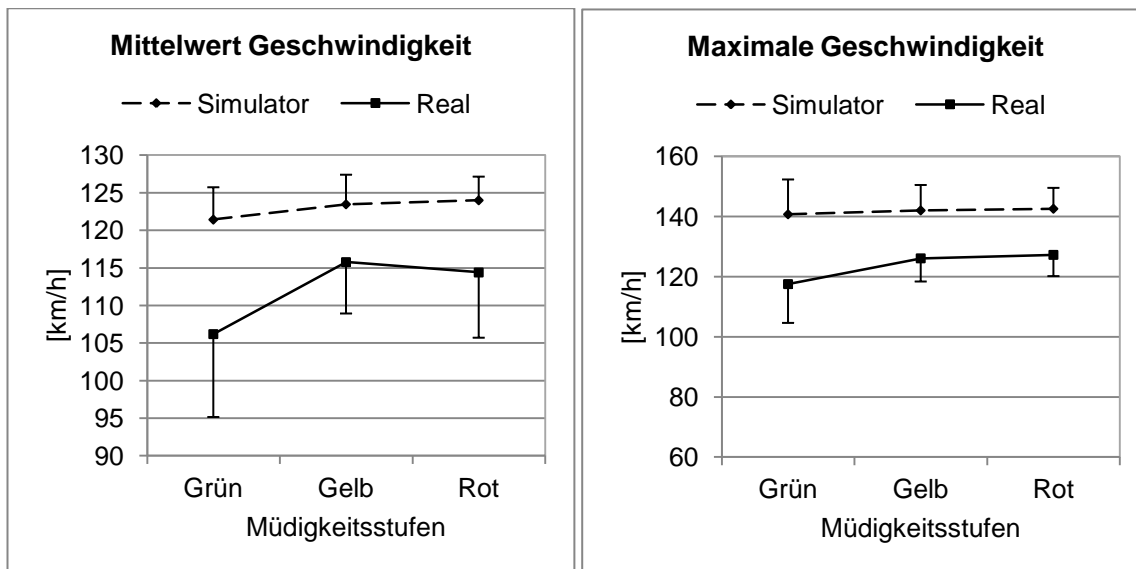


Abbildung 42: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

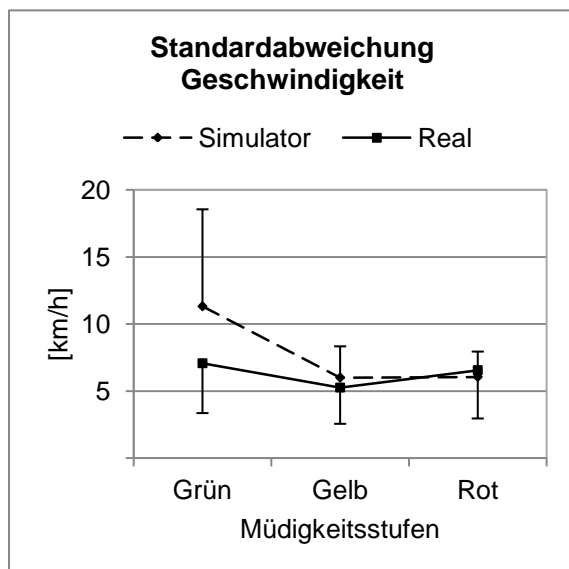


Abbildung 43: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Hinsichtlich der Interaktionen zeigt sich, dass sich die Fahrumgebungen in der grünen und gelben Stufe in allen drei abhängigen Variablen unterscheiden, in der roten Stufe jedoch nur bei der mittleren und maximalen Geschwindigkeit.

In der mittleren Geschwindigkeit zeigt sich in der Realfahrt ein signifikanter Anstieg von der grünen (106 km/h) zur gelben (115 km/h) und der grünen zur roten (114 km/h) Stufe. Dieser Effekt findet sich in der Simulation nicht.

Für die maximale Geschwindigkeit zeigt sich in der realen Fahrumgebung ein signifikanter Anstieg von grün (117 km/h) zu gelb (131 km/h) und grün zu rot (133 km/h).

Für die Standardabweichung zeigt sich im Simulator eine signifikante Verringerung der Geschwindigkeit von grün (11 km/h) zu gelb (6 km/h) und grün zu rot (6 km/h). In der Realität findet sich eine geringere Standardabweichung der Ge-

schwindigkeit in der gelben (5 km/h) Stufe im Vergleich zur grünen (7 km/h) Stufe. Zudem wird der Anstieg in der Realität für die Standardabweichung von gelb zu rot (6 km/h) signifikant.

Betrachtet man die Ergebnisse, so zeigt sich das gleiche Bild wie in den Analysen zuvor. Auch hier wurden auf der realen Straße geringere Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeiten beobachtet als im Simulator. Der Einfluss der Müdigkeit auf das Geschwindigkeitsverhalten spiegelt sich unabhängig von der Fahrumgebung in der maximalen Geschwindigkeit wieder, wobei mit zunehmender Müdigkeit schneller gefahren wird. Zudem zeigt sich, dass die Geschwindigkeitsvarianz mit leichter Müdigkeit sinkt, dann allerdings wieder ansteigt. Insgesamt betrachtet finden sich die Müdigkeitseinflüsse vorrangig im realen Straßenverkehr wieder. Anders als in der abhängigen Analyse zeigt sich hier, dass eine Differenzierung in den höheren Müdigkeitsstufen anhand der Standardabweichung erfolgen kann. Jedoch gilt dies nur in der Realität. Was sich hier auch wieder zeigt, ist das Verhalten der Fahrer die Aufgabe schwieriger zu gestalten. Dies zeigt sich in der Erhöhung der Geschwindigkeit. Interessant ist, dass diese Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit bei der mittleren Geschwindigkeit nach der mittleren Müdigkeit wieder nachlässt. Zumindest findet sich das im realen Fahrgeschehen wider. Für diesen Effekt könnte das Zusammenspiel mit der Standardabweichung verantwortlich sein. Diese reduziert sich in der mittleren Müdigkeit und wird erst wieder bei größerer Müdigkeit höher.

4.4.2 Diskussion unabhängige und abhängige Datenanalyse des Fahrverhaltens

Da sowohl in der abhängigen als auch in der unabhängigen Analyse Verhaltensänderungen vorliegen, die Gründe für diese jedoch gleich bleiben, wird hier primär der Unterschied bzw. die Gemeinsamkeit der beiden Analyseverfahren diskutiert um dadurch gemeinsame Fahrparameter für die Müdigkeitserkennung zu identifizieren. Der Grund hierfür soll kurz erklärt werden.

Die heutigen Systeme die bereits in den Fahrzeugen zum Einsatz kommen, detektieren Müdigkeit im Allgemeinen anhand einer Baseline (vgl. Kapitel 2.7). Diese Baseline vom vermeintlich wachen Fahrer wird am Anfang der Fahrt (vgl. Galley et al. 2005; Manstetten, 2008) erstellt (meist innerhalb der ersten 20 Minuten) und die ermittelten Werte werden dann zyklisch mit jenen verglichen, die der Fahrer zu einem späteren Zeitpunkt zeigt. Diese Methode hat ansatzweise seine Berechtigung, da sich Müdigkeit - wie viele Untersuchungen zeigen - sehr unterschiedlich äußern kann und somit dem individuellen Unterschied Rechnung getragen wird. Dass die Annahme eines wachen Fahrers jedoch kaum haltbar ist, wird durch vorliegende Arbeit belegt.

Wie sich in den Kapiteln zu den Müdigkeitsstufen und Müdigkeitsverläufen (Kapitel 4.1) in Rahmen dieser empirischen Untersuchungen gezeigt hat, ist kaum ein Fahrer absolut wach in das Fahrzeug gestiegen. Da die Fahrten erst um 20 Uhr begannen, und die meisten einen normalen Arbeitstag hinter sich hatten, spiegelt dies realistische Alltagsbedingungen wider. Die Annahme der Wachheit der Fahrer zu Beginn einer Fahrt wird allerdings von diesen Müdigkeitssystemen getroffen. Dies ist auch, wie bereits schon erwähnt ihr größter Schwachpunkt. Nimmt man alleine die

Zahlen aus der vorliegenden Arbeit, so zeigt sich hier, dass lediglich ca. 17 % der Personen am Anfang der Fahrt als wach beurteilt wurden. Demzufolge trifft die Annahme, man vergleicht das Fahrprofil eines wachen Fahrers mit jenen eines müden bei 83 % nicht zu.

Aus diesem Grund scheint die Überlegung sinnvoll unterschiedliche methodische Verfahren zu vergleichen, um festzustellen welche Rolle die individuelle Veränderung über die Müdigkeitsstufen tatsächlich spielt. So kann man herausarbeiten, ob eine Baseleine wirklich als sinnvoll zu erachten ist.

Aus diesem Grund wurden die gleichen Personen die für die abhängige Messung verwendet wurden nochmals nach einem unabhängigen Versuchsdesign verrechnet.

In dieser Diskussion sollen nun die Unterschiede zwischen diesen beiden Verfahren hinsichtlich der Müdigkeitsauswirkungen auf das Fahrverhalten besprochen werden. Um die Vielzahl an Ergebnissen hinsichtlich der Faktoren Müdigkeit, Fahrumgebung und Analysemethode besser zu veranschaulichen soll Tabelle 34 verwendet werden. In dieser Tabelle ist dargestellt, welche Fahrparameter in beiden Analysen ein Müdigkeitsveränderung abbilden können, ob sie in der Lage sind zwischen unterschiedlichen Fahrumgebungen (Real vs. Simulator) zu unterscheiden und ob sie sich in der abhängigen sowie auch in der unabhängigen Analyse verändern.

Tabelle 34: Abhängig und unabhängig Veränderung sensitive Fahrparameter für Müdigkeit und Fahrumgebung.

| Fahrparameter | Gleicher Verlauf in beiden Berechnungen | Müdigkeitssensitiv | Fahrumgebungssensitiv | Müdigkeitsveränderung zwischen Personen | Müdigkeitsveränderung innerhalb Person |
|------------------------------------|---|--------------------|-----------------------|---|--|
| Standardabweichung Lenkradwinkel | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Absoluter Lenkradwinkel | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Mittelwert rechter Rand | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Standardabweichung rechter Rand | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Absolute Abweichung rechter Rand | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| TDLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mittelwert TLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Standardabweichung TLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mittelwert Geschwindigkeit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Maximale Geschwindigkeit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Wie sich in Tabelle 34 zeigt, sind die meisten Fahrparameter dazu geeignet, Müdigkeitsveränderung sowohl innerhalb als auch zwischen Personen zu erkennen. Nachfolgend werden die einzelnen Fahrparameter im Kontext der beiden Analysen besprochen.

Für den Lenkradwinkel konnte in der abhängigen Messung ein signifikanter Einfluss der Müdigkeit auf die Standardabweichung des Lenkradwinkels gefunden werden. Dieser Effekt fand sich ebenso in der unabhängigen Messung. Hinsichtlich des Verlaufs ergibt sich für beide Berechnungen ein U-förmiger Verlauf über die Müdigkeit hinweg. Demzufolge zeigt sich in der abhängigen wie auch in der unabhängigen Messung, dass sich die Lenkaktivität mit steigender Müdigkeit zuerst verringert und dann wieder erhöht. Da sich dieser Effekt in beiden Analysen zeigt, kann die Annahme gestützt werden, dass mittlere Müdigkeit generell zuerst mit einer verringerten Lenkaktivität einhergeht. Steigt die Müdigkeit weiter an, führt die erforderliche Korrektur des ebenfalls ansteigenden absoluten Lenkradwinkel wiederum zu einem Anstieg der Standardabweichung. Dieser Effekt für den absoluten Lenkradwinkel findet sich jedoch nur in der unabhängigen Berechnung wieder und auch dort nur bei sehr hoher Müdigkeit. Die gefundenen Effekte stimmen mit denen in der Literatur angeführten Müdigkeitseffekten auf die Lenkaktivität überein (Kapitel 2.6.1). Dort wird das Verhältnis zwischen Lenkruhephasen und erhöhten Lenkausschlägen als Time-Still-Kriterium bezeichnet. Mit zunehmender Müdigkeit lenken Fahrer weniger und müssen dann die beeinträchtigte Spurhaltung mit einer größeren Lenkbewegung in die Gegenrichtung kompensieren (Galley, Hentschel & Kuhn, 2000). Ebenso lässt sich dieses Verhalten unabhängig von der verwendeten Analyse auch sehr gut mit dem eingeführten erweiterten Müdigkeitsmodell erklären, welches hier nochmals veranschaulicht wird (Abbildung 44). Auch hier wird davon ausgegangen, dass der Effekt von Müdigkeit durch ein Kompensationsverhalten korrigiert wird. Hiermit lässt es sich erklären, dass zuerst die Lenkaktivität abnimmt, mit weiter steigender Müdigkeit jedoch zur Kompensation wieder ansteigt was allerdings auch als Ausfallerscheinung betrachtet werden kann.

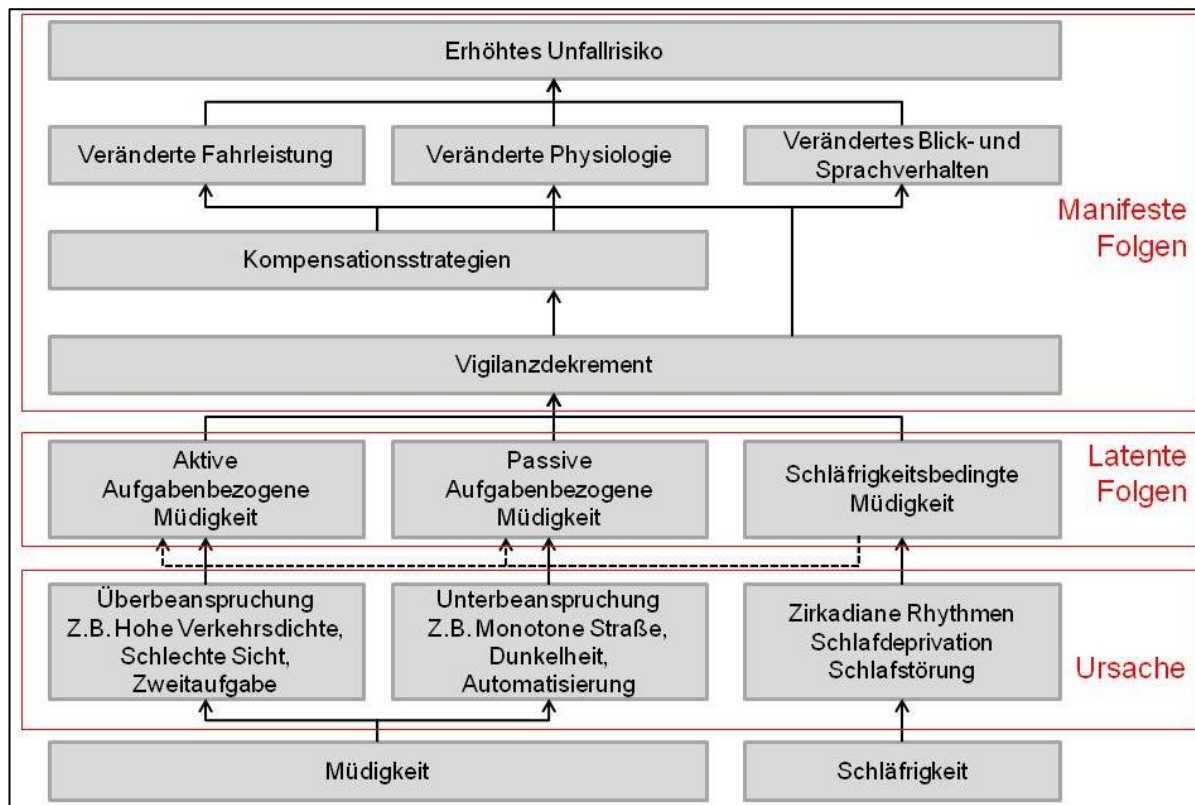


Abbildung 44: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009).

Der Einfluss der Fahrumgebung auf die Lenkaktivität stellt sich ebenfalls in beiden Berechnungsmethoden gleich dar. Hierbei ist in der Simulation die Lenkaktivität höher als in der Realität. Auch hier kommen höchstwahrscheinlich Simulatorartefakte zu tragen, die sich durch die verzögerte und rein visuelle Rückmeldung der Fahrzeugbewegungen durch den Simulator zeigen. Zudem könnte sich durch die Rückmeldung (Gegenkraft) des Lenkrads ebenfalls ein Unterschied zwischen den beiden Fahrumgebungen ergeben. Da das Fahrzeugmodell des Simulators jedoch auf einem realen Fahrzeugmodell beruht, ist davon auszugehen, dass auch die Gegenkraft des Lenkrads zu keinem Unterschied führt. Allerdings ist zu bedenken, dass es im Simulator weder Seitenwind noch Straßenunebenheiten gegeben hat die zu einer erhöhten Lenkreaktion hätten führen können.

Die Darstellung der Strecke, und insbesondere der Kurven im Simulator war so ausgelegt, dass diese nicht zu einer erhöhten Lenkaktivität führten. In der Realfahrt wurde nur eine Autobahn verwendet, daher ist auch hier davon auszugehen, dass dort keine starken Kurven vorhanden waren. Zudem waren im Simulator keinerlei Überholmanöver notwendig, da es keinen Vorderfahrer gab. Hier müsste sich, wenn überhaupt, eine erhöhte Lenkaktivität im Realverkehr zeigen, da „nur“ die drei Sekunden vor und nach dem Überholvorgang aus der Auswertung gefiltert wurden (vgl. Kapitel 3.3.8). Somit könnten also, bei einem sehr zögerlichen Überholvorgang noch Lenkaktivitäten mit aufgezeichnet worden sein. Ein möglicher weitere Grund für die Unterschiede in der Lenkaktivität könnte noch darin begründet sein, dass der Sensor am Lenkrad im Realfahrzeug nicht sensitiv genug war bzw. die zeitliche Auflösung zu gering war, um kleinste Lenkbewegungen zu registrieren.

In Abhängigkeit der Müdigkeit unterscheiden sich die Fahrparameter „absolute Abweichung vom rechten Rand“ und „Zeit < 10 cm welche am rechten Rand gefahren wird“ (TDLC) sowohl in der abhängigen als auch in der unabhängigen Messung. Zusätzlich findet sich in der abhängigen Messung, dass auch Effekte der Müdigkeit auf die Standardabweichung zum rechten Rand zu beobachten sind.

Die absolute Abweichung vom rechten Rand unterscheidet sich zwischen den Müdigkeitsstufen, der Verlauf in beiden Berechnungen stellte sich jedoch unterschiedlich dar. In der abhängigen Messung steigt die Abweichung mit zunehmender Müdigkeit an, in der unabhängigen Messung nimmt sie hingegen ab. Der Grund dafür könnte sein, dass der Ausgangswert in der unabhängigen Messung im Simulator viel höher ist, und so durch die Müdigkeit nicht weiter steigen konnte. In der unabhängigen Messung ist dieser Wert deswegen höher, da dort jeder Wert pro Müdigkeitsstufe einzeln eingeht. In der abhängigen Messung wurden die Werte einer Person pro Müdigkeitsstufe zuerst gemittelt und gingen erst dann in die Analyse ein, wodurch sich noch ein Anstieg im absoluten Abstand nachweisen lässt. Zudem spiegelt das Verhalten in der abhängigen Messung auch jenes Verhalten wieder, dass bei Müdigkeitsunfällen oft beobachtet wird. Dort zeigt es sich, dass übermüdete Fahrer die Fahrspur über den rechten Rand verlassen. Eine Erhöhung der absoluten Abweichung vom rechten Rand stellt somit den Vorboten eines nahenden Unfalls dar.

Die TDLC zeigt in der abhängigen Analyse einen Anstieg mit steigender Müdigkeit unabhängig der Fahrumgebung, bei der unabhängigen Analyse findet dieser Anstieg nur im Realverkehr statt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass im Simulator die Streuung innerhalb der Gruppen bei der unabhängigen Messung sehr groß war, und so die Müdigkeitseffekte nicht mehr signifikant wurden.

Für die mittlere sowie die Standardabweichung der TLC zeigt sich in beiden Untersuchungen, dass diese Parameter sensitiv auf Müdigkeit reagieren. Hinsichtlich des Verlaufs über die Müdigkeitsstufen hinweg findet sich in beiden Analysen eine Abnahme der mittleren TLC bei einer gleichzeitigen Zunahme der Standardabweichung mit steigender Müdigkeit. Auch im Hinblick auf die beiden Fahrumgebungen kommt es bei beiden Analysemethoden zum gleichen Ergebnis. Sowohl abhängig als auch unabhängig finden sich in der Realität größere zeitliche Abstände bis zum Überfahren der rechten Fahrspurmarkierung, zudem ist die Schwankung geringer. Dies zeigt auch hier wieder das Sicherheitsverhalten der Fahrer in der realen Verkehrsumgebung, welches durch die Ähnlichkeit der Ergebnisse der beiden Analysen unabhängig von individuellen Einflüssen scheint.

Für die Querregulation kann man folgendes festhalten: Mit zunehmender Müdigkeit beginnt der Fahrer um seine gewählte Ideallinie stärker zu schwanken, was jedoch nur eine individuelle Veränderung zu sein scheint. Hier wäre eine Baselinemessung als durchaus sinnvoll zu erachten. Hierbei wird allerdings die vom Fahrer gewählte Ideallinie auf der Spur (Mittelwert Abweichung vom rechten Rand) nicht verschoben jedoch die absolute Abweichung vom rechten Rand. Zudem verlängert sich der zeitliche Aufenthalt nahe der rechten Spurmarkierung.

Als letzter Fahrparameter soll das Geschwindigkeitsverhalten in beiden Analysen gegenübergestellt werden. Grundsätzlich zeigt sich in beiden Berechnungsmethoden der gleiche Verlauf der einzelnen Geschwindigkeitsparameter. Es zeigt sich, dass die mittlere und maximale Geschwindigkeit mit zunehmender Müdigkeit steigt. Gleichzeitig kommt es auch zu einer Verringerung der Standardabweichung. Auch die Unterschiede in den Fahrumgebungen stellen sich in beiden Analysemethoden gleich dar. Auch hier wird im Fahrsimulator durchgängig schneller gefahren als in der Realität, zudem schwanken die Fahrer mehr um die gewählte Geschwindigkeit.

Somit lässt sich für das Geschwindigkeitsverhalten folgendes Bild erstellen. Beide Berechnungsmethoden zeigen nahezu identische Auswirkungen von Müdigkeit und Fahrumgebung auf das Verhalten der Fahrer. Stark müde Fahrer sind schneller unterwegs als wache Fahrer schwanken stärker um den Mittelwert. Dies bedeutet, dass sich hinsichtlich der Geschwindigkeit kein Vorteil der abhängigen Messung zeigt und für diesen Parameter eine Baselinephase daher nicht unbedingt notwendig ist. Des Weiteren ist hier ersichtlich, dass die Fahrer aktiv versuchen die Aufgabenschwierigkeit durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit zu steigern.

Betrachtet man Tabelle 34, so zeigt sich, dass nahezu alle untersuchten Parameter sowohl in der abhängigen Messung als auch in der unabhängigen Messung zwischen den Müdigkeitsstufen unterscheiden können.

Allerdings gilt es dabei zu beachten, dass einige der Parameter nur die individuellen Unterschiede in der Müdigkeit abbilden können, andere wiederum nur den inter-individuellen Unterschied erfassen. Den Schluss, den man daraus ziehen kann ist der, dass eine Kombination aus beiden Methoden möglicherweise die sinnvollste Überlegung ist. So könnte am Anfang einer Fahrt eine Person in bestimmte, generelle Grenzen zugeteilt werden, innerhalb derer sie dann entweder als wacher oder müder Fahrer klassifiziert wird. Gleichzeitig sollte von Fahrtbeginn an eine Baseline erstellt werden. Sofern der Fahrer während dieser Baselineerstellung definierte Grenzwerte nicht überschreitet, könnte diese Baseline für die weitere Fahrt zur Müdigkeitsdetektion verwendet werden.

Um den ersten Punkt zu adressieren, würde es Grenzen benötigen innerhalb derer sich ein Fahrer in seinem Fahrverhalten bewegen kann ohne als müder Fahrer eingeteilt zu werden.

Im Literaturteil der Arbeit wurde aufgezeigt, dass für die Müdigkeitsdefinition eines Fahrers, sofern nur Fahrdaten vorhanden sind, immer unterschiedliche Grenzen verwendet werden. So legt eine Autorengruppe müdes Fahrverhalten so aus, dass z.B. alle Räder über der Spurmarkierung sein müssen (vgl. Philip, et. al; 2005a, 2005b), eine andere Autorengruppe definiert müdes Fahrverhalten bereits dann, wenn z.B. nur ein Rad die Spurmarkierung überfahren hat (vgl. Fairclough, et. al, 1999). Andere wiederum gehen ab einer gewissen Standardabweichung in der Spurhaltung von Müdigkeit aus (vgl. Contradi, et. al, 2004; Hallvig et al., 2013).

Wie sich hier schon zeigt, fehlt ein gut definierter, auf empirischen Daten beruhender Grenzwert für ein waches bzw. müdes Fahrverhalten. Daher soll in dieser Arbeit erstmals ein klar definierter Raum aufgespannt werden, innerhalb welchen

sich ein wacher Fahrer bewegen kann bzw. bewegt. Die Ableitung dieser Grenzwerte stellt einen wichtigen Beitrag dieser Arbeit zur neuen Wissensgenerierung im Kontext von Müdigkeit dar und wird nachfolgend beschrieben.

4.5 Grenzwertableitung und Grenzwertbildung zur Trennung von wachem und müdem Fahrverhalten (reale Autobahn)

Eines der obersten Ziele bei dieser Grenzfestlegung ist es, dass sich das gezeigte Fahrverhalten in einem unkritischen Bereich bewegen muss. Hiermit werden vor allem jene Fälle adressiert, die mit Spurüberschreitung in Verbindung zu bringen sind, die grundsätzlich als kritisch zu betrachten sind. Würden sich derartige Grenzwerte aus den nachfolgenden Berechnungen ergeben, so würde hier maximal ein Wert zugelassen werden, in dem sich der Fahrer noch innerhalb seiner Spur befindet (d.h. Wert rechter Rand bis 0).

Wie sich in den Analysen zuvor zeigte, besitzt das Fahrverhalten, vor allem von wachen Fahrern eine gewisse Variabilität. Um dieser gerecht zu werden, war es ein Ziel die Grenzwerte so zu gestalten, dass eine bestimmte Flexibilität im Fahrverhalten zugelassen werden kann. Als Gegenkriterium war zu beachten, dass kein kritisches Fahrverhalten in diese Grenzwertbildung eingeht.

Die Ableitung dieser Grenzwerte wird auf Grundlage der Daten durchgeführt, die in dieser Untersuchung auf der realen Autobahn erhoben wurden. Anzumerken ist noch, dass die Grenzwerte für eine Geschwindigkeitsvorgabe von 120 km/h gelten und die Betrachtung der Werte im 10 Minutenrhythmus erfolgt. Durch dieses Vorgehen ist sichergestellt, dass die Übertragbarkeit auf ähnliche reale Verkehrsgegebenheiten vorhanden ist. Für die Erstellung der Grenzwerte wurde folgendes Vorgehen gewählt.

Ausgehend vom Mittelwert der grünen Fahrer inkl. eines 95% Intervalls wurde eine erste Grenze festgesetzt. Dies stellt zwar grundlegend schon eine mögliche Grenze für das Fahrverhalten dar, hätte allerdings den Nachteil, dass der Bereich in dem das Fahrverhalten stattfinden darf relativ eng wäre. Um dem individuellen Fahrverhalten, vor allem im wachen Zustand, mehr Spielraum zu ermöglichen wurde die endgültige Grenze für einen wachen Fahrer wie folgt definiert.

Die gelbe und rote Müdigkeitsstufe wurde zusammengefasst (Gelbrote Müdigkeitsstufe). Diese Zusammenlegung wurde durchgeführt, da sich in den Analyse zuvor zeigte, dass die gelbe und rote Müdigkeitsstufe nur in einigen wenigen Fahrparametern zu differenzieren sind. Von dieser neuen Müdigkeitsstufe wurde ebenfalls der Mittelwert inkl. 95%igen Konfidenzintervall berechnet. Als Grenzwert für das Fahrverhalten eines wachen Fahrers wurde die Differenz zwischen den 95%igen Müdigkeitsintervallen berechnet und der halbe Wert dieser Berechnung zur grünen Müdigkeitsstufe inkl. Konfidenzintervall hinzugerechnet. Ein Beispiel soll dieses Vorgehen veranschaulichen.

Mittelwert Grün: 100 km/h, 95%iges Konfidenzintervall +/- 5 km/h

Mittelwert Gelbrot: 120 km/h, 95%iges Konfidenzintervall +/- 5 km/h

Differenzbildung:

Oberes Ende Mittelwert Grün: 105 km/h

Unteres Ende Mittelwert Gelbrot: 115 km/h

$115 \text{ km/h} - 105 \text{ km/h} = 10 \text{ km/h} / 2 = 5 \text{ km/h}$

Grenzwert:

Oberes Ende Mittelwert Grün inkl. Konfidenzintervall = $105 + \text{Differenz} = 5$

➤ Grenzwert = 110 km/h

Aus dieser beispielhaften Berechnung ergibt sich, dass eine mittlere Geschwindigkeit von mehr als 110 km/h als müdes bzw. nicht mehr waches Fahrverhalten eingeteilt wird.

Diese Berechnungen wurden für sämtliche Fahrparameter durchgeführt. Die dadurch entstandenen Grenzwerte sind aus Tabelle 35 ersichtlich.

Tabelle 35: Grenzwerte der Fahrdaten für einen wachen Fahrer.

| Parameter | Grüne Müdigkeitsstufe |
|-----------------------|-----------------------|
| Lenkradwinkel SD | < 1.67° |
| Lenkradwinkel absolut | < 8.53° |
| Rechter Rand MW | > 0.98 m |
| Rechter Rand SD | < 0.31 m |
| Rechter Rand Max | < 2.11 m |
| TDLC < 10 cm | < 1.11 % |
| TLC MW | > 1.82 sek |
| TLC SD | < 0.27 sek |
| Geschwindigkeit MW | < 109.68 km/h |
| Geschwindigkeit SD | > 7.87 km/h |
| Geschwindigkeit Max | < 121.22 km/h |

Betrachtet man Tabelle 35 so zeigt sich, dass durch die berechneten Grenzwerte ein sicheres Fahren mit einer großen Variation möglich ist. Somit wurden durch diese Berechnungen beide Anforderungen, ein sicheres Fahrverhalten und ein möglichst großer Spielraum, erfüllt.

Diese Grenzwertbildung stellt einen wichtigen Beitrag für die Müdigkeitserkennung im Fahrzeug dar. Hiermit ist es nun möglich, jeden Fahrer anhand seines Fahrverhaltens als wach zu klassifizieren oder nicht. Hierfür wäre es nur notwendig, den aktuellen Fahrparameterwert mit den erstellten Müdigkeitsgrenzwerten abzugleichen. Dies würde grundsätzlich funktionieren. Allerdings wäre dann die gleiche Situation, wie sie auch in der Literatur vorherrscht. Dort werden ebenfalls Parameter vorgestellt, die Müdigkeit im Fahrverhalten repräsentieren. Die Fahrer werden dann anhand eines Parameters in die entsprechende Müdigkeitsgruppe eingeteilt (z.B. Überfahren der Spurmarkierung). Dies ist auch grundsätzlich möglich.

Jedoch, so zeigten auch die Analysen zuvor, sind unterschiedliche Fahrparameter für unterschiedliche Müdigkeitsstufen sensitiv. Demzufolge würde eine einfache Klassifizierung, einzeln für jeden Fahrparameter, kein korrektes Ergebnis hinsichtlich einer Müdigkeitsdetektion liefern.

Um dieses Problem zu umgehen, ist es notwendig Kombinationen aus den einzelnen Fahrparametern zu erstellen. Diese Kombinationsmöglichkeiten sollen im optimalen Fall eine gute Klassifizierung von müden, jedoch auch von wachen Fahrern ermöglichen. Die für diesen Zweck durchgeführten Berechnungen werden nachfolgend dargestellt.

4.6 Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen (reale Autobahn)

Die Diskriminanzanalyse wird mit sämtlichen abhängigen Variablen (Kapitel 4.3.3) durchgeführt, welche bereits für die Berechnung der MANOVAs herangezogen wurden. Als Gruppierungsvariable werden die drei Müdigkeitsstufen (grün, gelb, rot) verwendet. Abweichend von den Varianzanalysen werden hier nur die Daten jener Fahrer verrechnet, die auf einer realen Autobahn aufgezeichnet wurden. Somit ergibt sich hier ein Datensatz, der aus 12 Personen besteht, die insgesamt mit 36 Werten (12 je Müdigkeitsstufe) (Tabelle 36) in die Berechnung eingehen.

Dieses Vorgehen wird gewählt, da sich in den Analysen zuvor Unterschiede zwischen den beiden Fahrumgebungen ergeben haben. Des Weiteren soll ein Detektionsalgorithmus, sprich ein Modell erstellt werden welcher bzw. welches auf ein reales Fahrverhalten übertragbar ist. Dies ist auf Grund der vorigen Befunde nur möglich wenn die Daten für die Modellerstellung aus der Fahrumgebung stammen, in der diese dann angewendet werden sollen. Zur Prüfung der Qualität des erstellten Modells werden nach der Modellerstellung drei Validierungsschritte durchgeführt. Hiermit soll aufgezeigt werden, welche Güte das erstellte Modell besitzt.

Für die Berechnung wurden alle Variablen gleichzeitig in das Modell aufgenommen. Der Grund hierfür war, dass je nach Müdigkeitsstufe unterschiedliche Variablen sensitiv auf Müdigkeit reagieren und dadurch ein valides Modell erstellt werden soll.

Tabelle 36: Anzahl 10-Minutenabschnitte für die drei Müdigkeitsstufen.

| | Wertelabel | Anzahl Zeitabschnitte |
|-------------------------------------|------------|-----------------------|
| Müdigkeitsstufe (Fremdbewertung) | Grün | 12 |
| | Gelb | 12 |
| | Rot | 12 |
| Σ | | 36 |

Durch dieses Variablen ist eine tendenziell signifikante Trennung der Müdigkeitsstufen durch die Diskriminanzfunktion möglich ($\chi^2_{(22)} = 31.8$; $p = .081$; Wilks-Lambda = .321). Des Weiteren können durch die Diskriminanzfunktion 87.5 % der Varianz aufgeklärt werden.

Betrachtet man die standardisierten Variablen, geordnet nach Diskriminierungskoeffizient, so zeigt sich, dass alle drei Geschwindigkeitsparameter den höchsten Beitrag zur Gruppentrennung liefern (Tabelle 37), gefolgt von der mittleren TLC und der mittleren Abweichung zum rechten Rand. Die neu berechnete Variable $TDLC < 10$ cm stellt den geringsten Koeffizienten dar.

Tabelle 37: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten.

| Parameter | Koeffizient |
|---------------------|-------------|
| Geschwindigkeit Max | 1.863 |
| Geschwindigkeit SD | 0.906 |
| Geschwindigkeit MW | 0.777 |
| TLC MW | 0.567 |
| Rechter Rand MW | 0.389 |
| Lenkradwinkel ABS | 0.383 |
| TLC SD | 0.372 |
| Rechter Rand SD | 0.227 |
| Lenkradwinkel SD | 0.131 |
| Rechter Rand ABS | 0.117 |
| TDLC < 10 cm | 0.089 |

Als nächstes soll der Frage nachgegangen werden mit welcher Zuverlässigkeit die Erkennung vollzogen wird.

In der Klassifizierungstabelle (Tabelle 38) zeigt sich, dass durch die Variablen eine richtige Klassifizierung von 72.2 % der Fälle möglich ist. Bei der durch die Diskriminanzanalyse durchgeführten Kreuzvalidierung (hierbei wird ein Fall aus der Grundgesamt entfernt, ein Modell erstellt und dann der entfernte Fall mit dem Modell klassifiziert) zeigt sich ein deutlicher Einbruch des Klassifizierungsergebnisses. Der Prozentsatz an richtigen Klassifizierungen nach der Kreuzvalidierung beträgt nur noch 38.9 %.

Tabelle 38: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für drei Müdigkeitsstufen.

| | | | Vorhergesagte Müdigkeitsstufe | | | |
|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|------|------|-----|
| | | Müdigkeitsstufe | grün | gelb | rot | Σ |
| Beobachtet | Anzahl | grün | 10 | 2 | 0 | 12 |
| | | gelb | 1 | 8 | 3 | 12 |
| | | rot | 2 | 2 | 8 | 12 |
| | % | grün | 83.3 | 16.7 | 0 | 100 |
| | | gelb | 8.3 | 66.7 | 25.0 | 100 |
| | | rot | 16.7 | 16.7 | 66.7 | 100 |
| Kreuzvalidiert | Anzahl | grün | 8 | 3 | 1 | 12 |
| | | gelb | 3 | 3 | 6 | 12 |
| | | rot | 2 | 7 | 3 | 12 |
| | % | grün | 66.7 | 25.0 | 8.3 | 100 |
| | | gelb | 25.0 | 25.0 | 50.0 | 100 |
| | | rot | 16.7 | 58.3 | 25.0 | 100 |

Anmerkung: Fett dargestellt sind die korrekten Klassifizierungen.

Wie man aus Tabelle 38 entnehmen kann, wird vor allem für die wachen Fahrer ein sehr gutes Zuordnungsergebnis erreicht (83.3 %). Für die müden und sehr müden Fahrer ist das Klassifizierungsergebnis jedoch nicht sehr befriedend. Hier zeigt sich, dass jeweils 2/3 der Fahrer in die entsprechende Müdigkeitsstufe eingeteilt wurden. Interessant ist, dass in der gelben Stufe mehr Fahrer als müde eingeteilt werden, als sie tatsächlich sind. Dieser Effekt kehrt sich bei den sehr müden Fahrern wieder um. Hier werden Fahrer als wacher klassifiziert als sie auf Grundlage der Fremdreferenzierung eingestuft werden.

Für die einfache Kreuzvalidierung stellt sich das Ergebnis noch schlechter dar. Hier werden zwar die wachen Fahrer relativ zuverlässig (66.7 %) in die entsprechende Gruppe eingeordnet, jedoch gelingt dies bei den müden und sehr müden Fahrern nur noch zu je 25 %. Dramatisch ist hier vor allem die falsche Zuordnung in der roten Müdigkeitsstufe. Hier werden insgesamt 75 % der Fahrer als wacher auf Grundlage der Fahrdaten beurteilt als sie tatsächlich sind.

Wie sich hier bereits zeigt, ist eine Zuordnung von bekannten Fällen recht zuverlässig möglich. Allerdings zeigt sich auch, dass es bereits bei einer geringfügigen Veränderung der Daten (Kreuzvalidierung) zu einem Einbruch des Klassifizierungsergebnisses kommt. Für eine echte Validierung des Modells würde man demzufolge keine recht guten Ergebnisse erwarten. Wie sich dies tatsächlich darstellt, wird nachfolgend gezeigt.

4.6.1 Modellerstellung

Aus den Variablen die zur Müdigkeitsidentifikation verwendet werden, wird ein Modell erstellt mit dem es möglich ist, neue Daten in die entsprechende Müdigkeitsstufe einzuteilen. Erst durch die Modellerstellung und die anschließende Validierung an neuen Daten, ist eine Aussage darüber möglich, wie gut das Modell tatsächlich geeignet ist Müdigkeit zu detektieren.

Das Diskriminanzmodell stellt sich allgemein wie folgt dar:

$$D = \text{Konstante} + \text{Variable 1} * \text{Koeffizient} + \text{Variable 2} * \text{Koeffizient} \dots \\ \dots + \text{Variable N} * \text{Koeffizient}$$

Die für das Modell notwendigen Koeffizienten werden durch die Diskriminanzanalyse ausgegeben (nicht standardisiert kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten).

Durch die hier vorliegenden Daten lässt sich somit folgendes Modell zur Müdigkeitsdetektion erstellen.

$$D = -2.876 + V_MAX * .234 + V_SD * -.422 + V_MW * -.111 + TLC_MW * -5.337 + \\ RR_MW * -2.374 + LW_ABS * .069 + TLC_SD * 3.558 + RR_SD * 2.979 + \\ LW_SD * -.299 + RR_ABS * .255 + TDLC * -.050$$

Eine erste Kreuzvalidierung durch die Wegnahme eines Falles erbrachte bereits erste Ergebnisse (Tabelle 38). Diese lassen jedoch darauf schließen, dass eine „echte“ Kreuzvalidierung erwartungsgemäß eher schlechtere Ergebnisse liefern wird.

Diese Modellvalidierung an bereits bekannten Daten (Daten auf Einzelebene) sowie unbekannten Daten wird im nächsten Auswertungsschritt durchgeführt.

4.6.2 Modellvalidierung

Für die Modellvalidierung werden drei Datensätze verwendet. Der erste Datensatz besteht aus den Rohwerten der abhängigen Messung. Wie beschrieben, wurden für

die abhängigen Messungen Mittelwerte für jeden Fahrer in den jeweiligen Müdigkeitsstufen gebildet mit denen Werte wurden dann das Detektionsmodell erstellt.

Für die erste Modellvalidierung werden nun diese Daten wieder auf Einzelebene betrachtet. D.h. die Werte aus den einzelnen Müdigkeitsstufe gehen wieder mit den jeweiligen Werten (z.B. Grün: 2 und 4, die von der Gelben mit 6 und 7 und die von der Roten mit 8 und 10 usw.) in die Modellüberprüfung.

Der zweite Datensatz der zur Modellüberprüfung verwendet wird, besteht aus Daten, die sowohl bekannte (Daten aus der Modellerstellung auf Einzelebene) als auch unbekannte neue Daten (Einzelebene) enthält.

Der dritte Datensatz beinhaltet nur Daten (Einzelebene), die gänzlich unbekannt sind. Durch diese Modellvalidierung soll aufgezeigt werden wie gut das Modell in der Lage ist unter variierenden Bedingungen eine Erkennungsleistung zu erbringen.

4.6.2.1 Modellvalidierung bekannter Datensatz

Im ersten Modellvalidierungsschritt werden bereits bekannte Daten, nur mit einer höheren zeitlichen Auflösung, verwendet. Die Anzahl an Müdigkeitsstufen sowie die korrekten Klassifizierungen sind aus Tabelle 39 ersichtlich.

Tabelle 39: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter Daten.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | | |
|----------------------------|------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| | | grün | gelb | rot | Σ |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 28 | 5 | 4 | 37 (75.6 %) |
| | gelb | 30 | 53 | 38 | 121 (43.8 %) |
| | rot | 12 | 24 | 30 | 66 (45.5 %) |
| Σ | | 70 (40 %) | 82 (64.6 %) | 72 (41.6 %) | 224 |

Zur Überprüfung des Modells mit den beobachteten Daten wird ein Chi-Quadrat-Test angewandt. Führt man das Verfahren für den vorliegenden Datensatz durch ($n = 224$), so ergibt sich hier eine statistische Signifikanz ($\chi^2_{(4)} = 44.6$; $p = .000$). Demzufolge gibt es zwischen den Müdigkeitswerten, die durch das Modell berechnet werden und den tatsächlich beobachteten Müdigkeitswerten eine überzufällige Übereinstimmung. Dies zeigt sich auch in der signifikanten Korrelation der beobachteten und berechneten Müdigkeitsstufen ($r = .352$; $p = .000$).

Um Aussagen darüber ableiten zu können, wie gut das Modell in der Lage ist unterschiedliche Müdigkeitszustände bei bekannten Daten zu entdecken werden für einen ersten Anhaltspunkt die Prozentwerte in Tabelle 39 dargestellt. Da es sich in den Analysen zuvor zeigte, dass die gelbe und rote Müdigkeitsstufe bestimmte Ähnlichkeiten besitzen, werden für die Modellbeurteilung die gelbe und rote Stufe zusammengefasst. Das Ergebnis dazu ist aus Tabelle 40 ersichtlich.

Tabelle 40: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | Σ |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|-------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 28 | 9 | 37 (75.6 %) |
| | gelb & rot | 42 | 145 | 187 (77.5 %) |
| Σ | | 70 (40.0 %) | 154 (5.8 %) | 224 |

Aus Tabelle 40 ist ersichtlich, dass das Modell 75.6 % der wachen Fahrer (Sensitivität) erkennen kann. Für die zusammengefassten Müdigkeitsstufen gelb und rot, gelingt eine richtige Erkennung (Spezifität) anhand des Modells in 77.5 % der Fälle.

Wie sich aus dieser Betrachtung zeigt, ist das erstellte Modell relativ gut in der Lage, Daten von bereits bekannten Fahrern, jedoch in zeitlich höherer Auflösung, wieder in die entsprechende Gruppe einzuordnen. Dies war ein Ergebnis welches auch zu erwarten war, da die zur Überprüfung verwendeten Daten nahezu ident mit den Daten der Modellerstellung waren.

4.6.2.2 Modellvalidierung bekannter und unbekannter Datensatz

Um zu prüfen, wie gut das Modell auf bekannte und nicht bekannte Daten angewendet werden kann, wurde in einem zweiten Schritt der Modellüberprüfung sämtliche Daten die aus den Realfahrten auf der Autobahn vorlagen mit Hilfe des Modells verrechnet. Somit werden hier nicht nur die Fahrer verwendet, die für die Modellerstellung herangezogen wurden, sondern eben sämtliche Fahrer, unabhängig davon, ob bestimmte Müdigkeitsstufen von dem Fahrer besetzt wurden oder nicht. Die Prüfung auf Übereinstimmung mit den beobachteten Werten erfolgt wieder durch einen Chi-Quadrat-Test. Für die vorliegenden Daten ($n = 423$) ergibt sich auch hier wieder ein statistisch signifikanter Wert ($\chi^2_{(4)} = 14.2$; $p = .007$). Demzufolge sind die Zusammenhänge zwischen den beobachteten und berechneten Müdigkeitsstufen, wie auch zuvor, überzufällig. Allerdings sieht man, dass die Trefferquote für die wachen Fahrer massiv zurück geht (Tabelle 41).

Tabelle 41: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | | Σ |
|----------------------------|------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | grün | gelb | rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 48 | 35 | 30 | 113 (42.5 %) |
| | gelb | 65 | 90 | 82 | 237 (37.9 %) |
| | rot | 14 | 27 | 32 | 73 (43.8 %) |
| Σ | | 127 (37.8 %) | 153 (58.8 %) | 144 (22.2 %) | 423 |

Zwar ergibt sich hier auch noch eine signifikante Korrelation der berechneten und beobachteten Müdigkeitsstufen, jedoch fällt diese relativ gering aus $r = .169$; $p = .000$).

Um auch hier wieder Aussagen darüber treffen zu können, wie gut nicht nur die wachen Fahrern, sondern vor allem auch die müden Fahrer durch das Modell er-

kannt werden können, werden wieder die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zusammengefasst (Tabelle 42).

Tabelle 42: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | |
|----------------------------|------------|---|--------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | Σ |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 48 | 65 | 113 (42.4 %) |
| | gelb & rot | 79 | 231 | 310 (74.5 %) |
| Σ | | 127 (37.7 %) | 296 (78.0 %) | 423 |

Wie sich in Tabelle 42 zeigt, fällt die Wahrscheinlichkeit einen wachen Fahrer mit dem Modell zu erkennen von 75 % auf 42 % (vgl. Tabelle 42 vs. Tabelle 40). Ebenso verringert sich auch der prozentuelle Anteil richtig erkannter müder Fahrer von 77 % auf 74 %. Zwar sinken beide Erkennungsleistungen ab, jedoch fällt die der müden Fahrer nicht so sehr ab wie die der wachen Fahrer.

Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass sich das Fahrverhalten der müden Fahrer ähnlicher ist, als jenes der wachen Fahrer. Allerdings könnte die relativ hohe Detektionsleistung für die müden Fahrer auch daran liegen, dass in dieser Analyse noch Daten vorhanden sind, die zur Modellerstellung verwendet wurden.

4.6.2.3 Modellvalidierung unbekannter Datensatz

Zur Prüfung, ob das Fahrverhalten von müden Fahrern eine gewisse Stabilität aufzeigt sowie der Güte der Klassifizierung von gänzlich unbekannten wird eine dritte Validierung durchgeführt. In dieser Analyse werden nur Daten von Fahrern verwendet, die nicht für die Modellerstellung herangezogen wurden.

Insgesamt standen für diese Modellvalidierung $n = 199$ Datensätze zur Verfügung. Der durchgeführte Chi-Quadrat-Test erbrachte für den vorliegenden Datensatz keine statistisch relevante Übereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Müdigkeitsstufen ($\chi^2_{(4)} = 1.40$; $p = .844$). Demzufolge ist zu erwarten, dass auch die Korrelation sehr gering ist, was sich auch zeigt ($r = -.009$; $p = .897$). Wie sich in Tabelle 43 zeigt, verringert sich auch die Erkennungsleistung des Modells für die wachen sowie die müden Fahrer nochmals.

Tabelle 43: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Daten.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | | Σ |
|----------------------------|------|--------------------------------------|-------------|------------|--------------|
| | | grün | gelb | rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 20 | 30 | 26 | 76 (26.3 %) |
| | gelb | 35 | 37 | 44 | 116 (31.8 %) |
| | rot | 2 | 3 | 2 | 7 (28.4 %) |
| Σ | | 57 (35.1 %) | 70 (52.8 %) | 72 (.02 %) | 199 |

Zudem ist aus Tabelle 43 ersichtlich, dass die rote Müdigkeitsstufe so gut wie fast nie beobachtet (7 von 199) wird. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Analysen werden die gelbe und rote Stufe wieder zusammengefasst.

Tabelle 44: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | Σ |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 20 | 56 | 76 (26.3 %) |
| | gelb & rot | 37 | 96 | 133 (72.2 %) |
| Σ | | 57 (35.1 %) | 153 (63.1 %) | 199 |

In Tabelle 44 zeigt sich, dass die Anzahl an korrekt erkannten wachen Fahrern nochmals gegenüber der vorangegangenen Analyse geringer ausfällt (42 % auf 26 %). Die Erkennung eines müden Fahrers anhand des Modells verringert sich hingegen nur noch geringfügig. Hier ist eine Abnahme im Vergleich zur vorigen Analyse um ca. 2 % (auf 72 %) zu beobachten.

4.6.3 Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen

Wie sich hier gezeigt hat, lässt sich anhand der Daten ein relativ gutes Modell erstellen. Die Modellerstellung erfolgte hierbei mit jenen Fahrern, die in allen drei Müdigkeitsstufen vorhanden waren. Grund hierfür war, dass dadurch eine bestmögliche Abbildung des Müdigkeitseinflusses gegeben ist. Zudem konnten dadurch die individuellen Einflüsse konstant gehalten werden.

Mit der Modellerstellung verhält es sich allerdings ähnlich wie mit den Varianzanalysen. Unterschiede bzw. Modelle sind schnell gefunden bzw. erstellt. Erst die Überprüfung von Modellen lässt eine Aussage darüber zu, wie gut das neue Modell tatsächlich die Wirklichkeit abbilden kann. Für jenes aus den Daten erstellte Modell, zeigen sich anfangs recht gute Klassifizierungsergebnisse. Allerdings deutet schon die Kreuzvalidierung eine nichtvorhandene Übertragbarkeit auf andere Daten an. Um dies zu prüfen, wurden im ersten Modellvalidierungsschritt die Daten, welche für die Erstellung aggregiert wurden, wieder aufgesplittet. Hier zeigt sich, dass die Erkennung, zumindest im Fall einer 2-er Betrachtung, d.h. grüne Müdigkeitsstufe vs. gelber und roter Müdigkeitsstufe zusammen ein durchaus gutes Ergebnis liefert. Die Erkennungsraten für die wachen Fahrer liegen hier über 75 %. Ähnlich hoch ist auch die Wahrscheinlichkeit einen müden Fahrer (77 %) zu erkennen. Der Grund für die gute Erkennungsleistung ist vor allem darin zu sehen, dass die Daten theoretisch die gleichen sind, wie jene für die Modellerstellung. Allerdings ist auch anzumerken, dass,

bezogen auf die Analysen zuvor, sich das Fahrverhalten von wachen Fahrern signifikant von jenen von müden Fahrern unterscheidet und dadurch auch die guten Ergebnisse erklärt werden können. Um dies zu prüfen, wurde das Modell in nächsten Schritt mit bekannten sowie auch unbekannten Daten gefüttert. Sofern der Unterschied zwischen den wachen und müden Fahrern tatsächlich über verschiedene Personen hinweg stabil sein sollte, müsste hier das Modell ebenfalls eine relativ gleiche Erkennungsleistung liefern.

Betrachtet man die Ergebnisse, so zeigt sich, dass sich sowohl die Detektion von wachen, wie aber auch von müden Fahrern verschlechtert. Hierbei halbiert sich die Erkennung von wachen Fahrern. Bei müden Fahrern ergibt sich eine Abnahme von ca. 2 %. D.h. dass es durch die Einbringung neuer unbekannter Fälle dem Modell erschwert wird, vor allem die wachen Fahrer noch korrekt zu klassifizieren. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass der individuelle Einfluss, der in der ersten Analyse konstant gehalten wurde, hier stärker zu tragen kommt. Interessant ist hier, dass sich zwar grundsätzlich eine Detektionsverschlechterung zeigt, diese allerdings bei den müden Fahrern deutlich geringer ausfällt. Grund könnte hier sein, dass sich das Fahrverhalten unter Müdigkeit, bzw. das Kompensationsverhalten der Fahrer um der Müdigkeit entgegen zu wirken, eher ähnlich ist. Im wachen Zustand kommt hier die größere Variabilität im Fahrverhalten zum Tragen, was sich dann letztendlich in der schlechten Detektionsleistung widerspiegelt. Dass dem so ist, zeigt dann auch die letzte Analyse, in der nur Daten aufgenommen wurden, die noch nicht bekannt waren.

Hier zeigt sich, dass die Erkennungsleistung im wachen Zustand weiter absinkt, auf knapp $\frac{1}{4}$ der Fälle. Wohingegen die müden Fahrer fast nahezu gleich gut wie in der Analyse mit gemischten Daten, erkannt werden. Hier kommt es lediglich zu einer Detektionsverringerung um 2 %. Somit lässt sich hier die Annahme stützen, dass müde Fahrer ein ähnliches Fahrverhalten zeigen, bzw. ähnliche Kompensationsstrategien zur Bekämpfung der Müdigkeit verwenden.

Ein weiterer Punkt, der noch zu diskutieren bleibt, ist das Modell als mögliche Schwachstelle. Wie beschrieben, wurden für die Modellerstellung nur jene Fahrer aufgenommen, die in allen drei Müdigkeitsstufen vorhanden waren. Somit wurde dieses Modell mit lediglich 12 Personen erstellt. Aufgrund der geringen Personenzahl ist es durchaus möglich, dass zum einen hier Fahrer verwendet wurden, die nur ein bestimmtes Fahrverhalten zeigen (z.B. mehr Lenkaktivität). Zum anderen würde bei einer derart geringen Anzahl ein extremes Fahrverhalten die Ergebnisse bzw. das erstellte Modell ebenfalls stark beeinflussen. Problematisch ist dies vor allem im wachen Müdigkeitszustand. Hier scheint das individuelle Fahrverhalten die Detektionsleistung besonders stark zu beeinflussen. Mit einer hinreichend großen Stichprobe, die ein breites Spektrum an Fahrverhalten beinhalten würde, könnte diesem Umstand begegnet werden. Dies ist allerdings im Zuge vorliegender Arbeit nicht mehr abschließend zu klären.

Fasst man diese Befunde zusammen, so zeigt sich, dass müde Fahrer relativ sicher erkannt werden können. Die Erkennung von wachen Fahrern stellt allerdings ein Problem dar. Dieses Ergebnis legt nun den Schluss nahe, dass ein individuell parametrisiertes Modell (sprich ein Modell mit Baseline) ein möglicher Schritt zur Verbesserung der Müdigkeitserkennung sein könnte.

Um diesen Aspekt zu beleuchten werden nachfolgend Analysen vorgestellt, die anhand dieser Methodik eine Müdigkeitsdetektion vornehmen.

4.7 Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen mit Baseline (reale Autobahn)

Um ein valides Modell erstellen zu können, werden wieder die Daten aus der abhängigen Messung verwendet, in welcher von jeder Versuchsperson mindestens ein Wert je Müdigkeitsstufe vorhanden ist. Auch in diese Analyse gehen nur die Daten der realen Autobahn ein. Als Gruppenvariable bleiben die drei Müdigkeitsstufen erhalten.

Für diese Analyse ist es jedoch nicht möglich mit den gemittelten Werten zu arbeiten. Dies würde dazu führen, dass wache Fahrer immer den Wert 0 hätten, da die grüne Müdigkeitsstufe als Baseline herangezogen wird. Für die Bildung der Differenzwerte würde demnach die grüne Müdigkeitsstufe von der grünen Müdigkeitsstufe abgezogen werden. Da damit keine Analyse berechnet werden kann, ist ein anderes Vorgehen notwendig.

Hierbei wird die Baseline (grüne Müdigkeitsstufe) als sogenannter 0-Wert festgelegt. Ein kurzes Beispiel soll dies veranschaulichen. Fahrer 1 hat zwei grüne Müdigkeitswerte und auch die jeweiligen Fahrparameter in dieser Müdigkeitsstufe z.B. V_MW 110 km/h und 120 km/h. Diese beiden Werte werden gemittelt = 115 km/h. Dieser Wert stellt dann den Baselinewert für den Fahrparameter „mittlere Geschwindigkeit“ dar. Dieser Wert wird dann von allen anderen Werten der mittleren Geschwindigkeit in allen Müdigkeitsstufen abgezogen. Sofern nur ein Wert in der grünen Müdigkeitsstufe vorhanden ist, wird dieser von allen anderen Werten abgezogen. Damit ist es möglich zusätzlich zur Detektion des müden Fahrers auch das Fahrverhalten der Fahrer im wachen Zustand zu detektieren. Diese Analyse wird in diesem Kapitel dargestellt.

Für die Berechnung werden alle Variablen gleichzeitig in das Modell aufgenommen. Insgesamt können durch dieses Vorgehen n = 218 Fälle für die Modellerstellung verwendet werden (Tabelle 45).

Tabelle 45: Anzahl 10-Minutenabschnitte für die drei Müdigkeitsstufen.

| | Wertelabel | Anzahl Zeitabschnitte |
|-------------------------------------|------------|-----------------------|
| Müdigkeitsstufe (Fremdbewertung) | Grün | 31 |
| | Gelb | 121 |
| | Rot | 66 |
| Σ | | 218 |

Durch die aufgenommen Fahrdaten ist eine signifikante Trennung der Müdigkeitsstufen durch die Diskriminanzfunktion möglich ($\chi^2_{(22)} = 84.0$; $p = .000$; Wilks-Lambda = .670). Des Weiteren können durch die Funktion 77 % der Varianz aufgeklärt werden.

Betrachtet man die standardisierten Variablen, geordnet nach Diskriminierungskoeffizient, so zeigt sich, dass die maximale Geschwindigkeit den höchsten Beitrag zur Gruppentrennung besitzt (Tabelle 46), gefolgt von den Standardabweichungen

vom rechten Rand, Lenkradwinkel sowie Geschwindigkeit. Diese Serie an Standardabweichungen wird durch den absoluten Lenkwinkelausschlag unterbrochen. Schlusslicht bilden nahezu alle Variablen, die den Mittelwert betreffen.

Tabelle 46: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten mit Baseline.

| Parameter | Koeffizient |
|---------------------|-------------|
| Geschwindigkeit Max | 0.624 |
| Rechter Rand SD | 0.388 |
| Lenkradwinkel SD | 0.384 |
| Geschwindigkeit SD | 0.312 |
| Lenkradwinkel ABS | 0.305 |
| TLC SD | 0.242 |
| Rechter Rand ABS | 0.155 |
| TDLC < 10 cm | 0.122 |
| Geschwindigkeit MW | 0.052 |
| TLC MW | 0.042 |
| Rechter Rand MW | 0.021 |

Hier zeigt sich schon, dass die Standardabweichungen, welche grundsätzlich individuell unterschiedlich sind, an Bedeutung für die Gruppenunterscheidung gewinnen. Die nächste Berechnung dient wieder zur Beantwortung der Zuverlässigkeit der Klassifizierung.

Die Zuteilung der einzelnen Zeitabschnitte zu den drei Müdigkeitsstufen zeigt, dass durch die Variablen eine richtige Klassifizierung zu 61.9 % möglich ist (Tabelle 47). Für die Kreuzvalidierung ergibt sich ein Ergebnis von 58.3 %.

Tabelle 47: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für drei Müdigkeitsstufen mit Baseline.

| | | Müdigkeitsstufe | Vorhergesagte Müdigkeitsstufe | | | Σ |
|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|------|------|-------|
| | | | grün | gelb | rot | |
| Beobachtet | Anzahl | grün | 13 | 16 | 2 | 31 |
| | | gelb | 6 | 106 | 9 | 121 |
| | | rot | 3 | 47 | 16 | 66 |
| | % | grün | 41.9 | 51.6 | 6.5 | 100.0 |
| | | gelb | 5.0 | 87.6 | 7.4 | 100.0 |
| | | rot | 4.5 | 71.2 | 24.2 | 100.0 |
| Kreuzvalidiert | Anzahl | grün | 11 | 18 | 2 | 31 |
| | | gelb | 6 | 103 | 12 | 121 |
| | | rot | 5 | 48 | 13 | 66 |
| | % | grün | 35.5 | 58.1 | 6.5 | 100.0 |
| | | gelb | 5.0 | 85.1 | 9.9 | 100.0 |
| | | rot | 7.6 | 72.7 | 19.7 | 100.0 |

Anmerkung: Fett dargestellt sind die korrekten Klassifizierungen.

Wie man aus Tabelle 47 entnehmen kann, wird vor allem für die mittel müden Fahrer ein sehr gutes Zuordnungsergebnis erreicht (87.6 %). Für die wachen und sehr müden Fahrer ist das Klassifizierungsergebnis jedoch nicht sehr befriedend (41.9 % bzw. 24.2 %). Für die wachen Fahrer ergibt sich zudem ein recht hohe Falschklassifikation in die gelbe Müdigkeitsstufe. Als fälschlicherweise sehr müde werden hingegen nur wenige wache Fahrer zugeteilt. Von den sehr müden Fahrern

(rot) werden fast $\frac{3}{4}$ in die gelbe Müdigkeitsstufe eingeteilt also als wacher klassifiziert. Als gänzlich wach werden aus der Gruppe der sehr müden Fahrer hingegen nur knapp 5 % vorhergesagt.

Für die einfache Kreuzvalidierung stellt sich das Ergebnis noch schlechter dar. Hier werden zwar die mittel müden Fahrer nahezu unverändert (85.1 %) in die entsprechende Gruppe eingeordnet, jedoch gelingt dies bei den wachen (35.5 %) und sehr müden Fahrern (19.7 %) nur noch sehr schlecht. Dramatisch bleibt auch hier weiter die falsche Zuordnung der sehr müden Fahrer. Hier werden insgesamt fast $\frac{3}{4}$ der Fahrer als wacher auf Grundlage der Fahrdaten beurteilt als sie tatsächlich sind.

Wie sich hier schon zeigt, ist auch hier das Klassifikationsergebnis nicht sehr gut. Allerdings gelingt es sehr gut die mittel müden Fahrer zu erkennen.

Wie im Abschnitt zuvor, wird auch hier wieder aus den Daten ein Modell erstellt, welches anschließend validiert wird.

4.7.1 Modellerstellung mit Baseline

Durch die hier vorliegenden Daten lässt sich folgendes Modell zur Müdigkeitsdetektion erstellen.

$$D = .064 + V_MAX * .073 + V_SD * -.099 + V_MW * .006 + TLC_MW * -.328 + RR_MW * -.114 + LW_ABS * .050 + TLC_SD * 1.867 + RR_SD * 4.590 + LW_SD * -.644 + RR_ABS * .269 + TDLC * -.056$$

Analog zum Vorgehen in der Analyse zuvor, wird das erstellte Modell einer Validierung unterzogen.

4.7.2 Modellvalidierung mit Baseline

Abweichend zur Modellvalidierung in den vorangegangenen Analysen besteht hier nicht die Möglichkeit nur bekannte Daten, allerdings auf Einzelebene, zu betrachten. Dies ist hier nicht möglich, da diese bereits für die Modellerstellung verwendet wurden. Aus diesem Grund wird als erste Modellvalidierung der gemischte Datensatz, mit bekannten und unbekannten Daten analysiert.

Der zweite Datensatz zur Modellvalidierung besteht aus Daten die gänzlich unbekannt sind. Durch diese Modellvalidierung soll wieder aufgezeigt werden wie gut das Modell in der Lage ist unter variierenden Bekanntheitsgraden der Daten eine Erkennungsleistung zu erbringen.

4.7.2.1 Modellvalidierung bekannter und unbekannter Datensatz mit Baseline

Für die erste Validierungsphase stehen insgesamt $n = 355$ Datensätze zur Verfügung. Somit sind in dieser Überprüfung 137 neue Fälle enthalten im Vergleich zur Modellerstellung. Betrachtet man Tabelle 48 so zeigt sich, dass die wachen Fahrer (16.3 %) nur sehr schlecht detektiert werden können. Für die etwas müden Fahrer fällt das Ergebnis hingegen sehr gut aus (83.7 %). Die sehr müden Fahrer werden ca. zu $\frac{1}{4}$ richtig detektiert.

Tabelle 48: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannten Daten mit Baseline.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | | |
|----------------------------|------|--------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| | | grün | gelb | rot | Σ |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 15 | 73 | 4 | 92 (16.3 %) |
| | gelb | 21 | 165 | 11 | 197 (83.7 %) |
| | rot | 3 | 47 | 16 | 66 (24.2 %) |
| Σ | | 39 (38.4 %) | 285 (57.8 %) | 31 (51.6 %) | 355 |

Führt man nun eine Überprüfung der Modelldaten mit den beobachteten Daten durch, so zeigt sich, dass die Übereinstimmung zwischen diesen Variablen überzufällig ist ($\chi^2_{(4)} = 28.3$; $p = .000$). Dies belegt auch die Korrelation zwischen den beobachteten und berechneten Müdigkeitsstufen ($r = .224$; $p = .000$).

Wie in den Analysen zuvor, wird zur besseren Vergleichbarkeit wieder die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zusammengelegt (Tabelle 49).

Tabelle 49: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen bekannter und unbekannter Daten, gelb und rot zusammengefasst mit Baseline.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | Σ |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 15 | 77 | 92 (16.3 %) |
| | gelb & rot | 24 | 239 | 263 (75.6 %) |
| Σ | | 39 (38.4 %) | 316 (90.8 %) | 355 |

Aus Tabelle 49 ist ersichtlich, dass das Modell 75.6 % der müden Fahrer erkennen kann. Für die grüne Müdigkeitsstufe gelingt dies allerdings nur in 16.3 % der Fälle.

Wie sich aus dieser Berechnung zeigt, ist das erstellte Modell relativ gut in der Lage, Daten von bereits bekannten sowie aber auch unbekannten Fahrern wieder in die entsprechende Gruppe einzuordnen. Vor allem für die müden Fahrer ist das Ergebnis sehr gut. Vergleicht man das Ergebnis mit jenem aus der nicht baselinekorrigierten Diskriminanzanalyse (Tabelle 42) so zeigt sich, zumindest für die müden Fahrer, ein sehr ähnliches Ergebnis. Auch dort konnten die müden Fahrer relativ sicher detektiert werden. Allerdings zeigt das dortige Modell (41 %) sowie auch dieses Modell (16 %) Schwächen bei der Erkennung von wachen Fahrern. Somit konnte trotz einer individuellen Baseline, welche das eigene Fahrverhalten besser abbilden soll, keine Verbesserung bei der Erkennung von wachen Fahrern gefunden werden.

Als letzte Überprüfung der Modellgüte wird wieder ein dem Modell unbekannter Datensatz zur Validierung herangezogen.

4.7.2.2 Modellvalidierung unbekannter Datensatz mit Baseline

Die Prüfung auf Übereinstimmung mit den beobachteten Werten erfolgt wieder durch einen Chi-Quadrat-Test. Für die vorliegenden Daten ($n = 137$) ergibt sich auch hier wieder ein statistisch signifikanter Wert ($\chi^2_{(2)} = 8.4$; $p = .015$) für die Übereinstimmung. Interessant ist hier allerdings die vorliegende negative Korrelation ($r = -.224$; $p = .009$). Zudem sieht man, dass real beobachtet keine Fahrer in diesem Da-

tensatz vorhanden waren, die als sehr müde (rot) beurteilt wurden, jedoch durch das Modell eine derartige Beurteilung vergeben wurde (Tabelle 50). Sehr schlecht fällt hier die „Wachdetektion“ der Fahrer aus. Diese werden nur in .03 % der Fälle, sprich so gut wie gar nicht, als wache Fahrer erkannt.

Tabelle 50: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Datensatz mit Baseline.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | | Σ |
|----------------------------|------|--------------------------------------|-------------|---------|-------------|
| | | grün | gelb | rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 2 | 57 | 2 | 61 (.03 %) |
| | gelb | 15 | 59 | 2 | 76 (77.6 %) |
| | rot | - | - | - | - |
| Σ | | 17 (11.7 %) | 116 50.8 %) | 4 (0 %) | 137 |

Fasst man auch hier wieder die beiden oberen Müdigkeitsstufen zusammen, so ergibt sich jenes Bild, welches aus Tabelle 51 ersichtlich ist.

Tabelle 51: Beobachtete und berechnete Müdigkeitsstufen unbekannter Datensatz, gelb und rot zusammengefasst mit Baseline.

| | | Müdigkeitsstufe aus Modell berechnet | | Σ |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|-------------|
| | | grün | gelb & rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 2 | 59 | 61 (.03 %) |
| | gelb & rot | 15 | 61 | 76 (80.2 %) |
| Σ | | 17 (11.7 %) | 116 (52.5 %) | 137 |

Wie sich in Tabelle 51 zeigt, fällt die Wahrscheinlichkeit einen wachen Fahrer mit dem Modell zu erkennen von 16 % auf nahezu 0 Prozent. Anders verhält es sich für die Detektionsrate der müden Fahrer. Diese erhöht sich bei unbekannten Daten sogar von 75 % auf etwas über 80 %. Wie sich hier schon zeigt, ist auch durch die Bildung einer Baseline nur eine bedingte Verbesserung der Müdigkeitsdetektion möglich.

4.7.3 Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalysen mit Baseline

Ausgehend von der Frage, ob eine Korrektur durch einen wachen Wert die Erkennungsleistung für Müdigkeitsveränderungen erhöht werden kann lässt sich hier folgendes postulieren.

Grundsätzlich scheint der Ansatz einigermaßen gut zu funktionieren (vgl. Tabelle 47). Vor allem für die müden Fahrer ist die Detektionsleistung durchaus befriedigend, selbst bei einer gemeinsamen Betrachtung der gelben und roten Müdigkeitsstufe zusammen bleibt das Ergebnis stabil. Verändert man den Bekanntheitsgrad der Daten, so kommt es vorwiegend bei den wachen Fahrern zu einem dramatischen Absinken der Detektionsleistung gegen Null. Ein Grund für dieses Absinken der Detektionsleistung könnte die individuelle Baseline sein. Werden diese Werte dann auf unbekannte Daten angewandt, die zwar ebenfalls baselinekorrigiert sind, sieht man, dass dies nicht funktioniert, da diese individuelle Korrektur einen sehr geringen Variationsbe-

reich offen lässt. Was sich hier zudem auch noch durchsetzt ist das individuelle Fahrverhalten, dass im wachen Zustand zu einer sehr hohen Variation führt. Durch diese Variation wird die Baseline in diesem Fahrerzustand überflüssig.

Bei den müden Fahrern kommt es hingegen sogar zu einem Anstieg der Müdigkeitsdetektion wenn die vorliegenden Daten gänzlich unbekannt sind. Hier könnte vor allem der Effekt in den Vordergrund treten, dass müde Fahrer ein zunehmend ähnliches Fahrverhalten aufweisen. Dies lässt sich zum Teil mit dem Anfangs eingeführten erweiterten Müdigkeitsmodell erklären (Abbildung 2) sowie mit dem von Schmidtke (1965) beschriebenen Müdigkeitsstufen. Hier zeigt sich, dass nach dem durchlaufen eines möglichen Kompensationsverhaltens die Fahrer einen Grad an Müdigkeit erreichen, in dem die individuellen Unterschiede so gering werden, dass es hier keinen Unterschied mehr gibt, ob die Daten bekannt oder unbekannt sind. Interessant ist dieses Ergebnis der guten Erkennung auch im Zusammenhang mit der Diskriminanzanalyse ohne Baseline. Auch hier wurden die müden Fahrer, auch wenn diese unbekannt waren, nahezu gleich gut erkannt wie mit einer Baseline (72 % vs. 80 %). Auch dies kann als Beleg dafür gesehen werden, dass sich das Fahrverhalten unter Müdigkeit zwischen Fahren zunehmend angleicht. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass eine größere Datenbasis die Erkennungsleistung zusätzlich nochmals erhöhen könnte, da mit einer derartigen großen Datenmenge noch mehr Variabilität abgebildet werden könnte.

Interessante Ergebnisse zeigen sich auch, wenn man die Variablen betrachtet, die zur Müdigkeitsdetektion mit einer Baseline beitragen. Sind es in der Analyse ohne Baseline vorrangig jene Fahrdaten, die auf den Mittelwerten beruhen (Tabelle 37), so sind es in der Berechnung mit Baseline vermehrt jene Fahrparameterwerte, die auf die Standardabweichung zurück zu führen sind (Tabelle 46).

Somit zeigt sich hier, dass die individuelle Veränderung vermehrt in der Standardabweichung abgebildet wird, wohingegen eine generelle Unterscheidung sicherer auf Grundlage von Mittelwerten stattfinden kann. Dies deckt sich mit den bisherigen Befunden in der Literatur recht gut (Kapitel 2.6). Auch hier werden vermehrt Parameter der Standardabweichung herangezogen um Müdigkeit zu identifizieren.

Durch diese Analysen ist es gelungen, die grundlegenden Unterschiede zwischen einer individualisierten und unabhängigen Müdigkeitsdetektion aufzuzeigen. Wie sich zeigt, ist vor allem die Erkennung von Fahrern im wachen Zustand als problematisch anzusehen. Die Erkennung eines müden Fahrers stellt hingegen kein großes Problem dar. Hierbei ist es zudem nahezu unerheblich, ob man nun bereits etwas über den Fahrer weiß, oder sich an fest vorgegebenen Grenzen orientiert (Tabelle 35).

Problematisch ist, wie beschrieben, die Erkennung des wachen Fahrers. Hier konnten durch die durchgeführten Detektionsverfahren weder mit Baseline noch ohne Baseline hinreichend befriedigende Ergebnisse erreicht werden. Demzufolge muss die Herausforderung für zukünftige Arbeiten sein, den wachen Fahrer sicher zu erkennen. Ebenso ist die Erkennung des müden Fahrers als sehr wichtig und auch verkehrsrelevant zu betrachten. Das Problem der fälschlichen Erkennung eines wachen Fahrers als müde, würde in der Realität dazu führen, dass der Fahrer nach mehrmaliger Falschklassifikation dem Assistenzsystem kein Vertrauen mehr entgegen bringen würde. Somit wäre der positive Effekt der guten Erkennung des müden Fahrers aufgehoben.

Wie sich hier zeigt, ist es durch Fahrdaten gut möglich, müde Fahrer zu detektieren. Für wache Fahrer trifft dies allerdings nicht zu. Aus diesem Grund sowie um die Müdigkeitsdetektion grundsätzlich zu verbessern, werden nach einem kurzen Exkurs auf die Landstraße, zusätzliche Parameter vorgestellt, die die Müdigkeitsdetektion verbessern könnten.

4.8 Exkurs Landstraße

In den vorangegangenen Analysen wurden nur Autobahnfahrten betrachtet, da aufgrund der oben angeführten Probleme die Landstraße nicht in die Innersubjektanalyse eingehen konnte (z.B. zu viele Messausfälle, kaum hohe Müdigkeitswerte). Zudem zeigt sich in der Literatur, dass bis dato kaum Studien vorhanden sind die sich dem Problem der Müdigkeit auf Landstraßen widmen. Deshalb sollen hier erste Erkenntnisse gewonnen werden, wie sich das Fahrverhalten unter Müdigkeit auf Landstraßen verändert.

Für die Analyse von Müdigkeitsauswirkungen im Fahrverhalten auf der Landstraße war eine Auswertung nach dem abhängigen Verfahren nicht möglich, da in den beiden Studien in denen Landstraßenabschnitte vorhanden waren, nur 3 Personen in allen drei Müdigkeitsstufen vorkamen. Zusätzlich waren Landstraßen nur in der ersten Simulatorstudie sowie in der ersten Realfahrt vorhanden, was den Datensatz zusätzlich verkleinert.

Für die Zwischensubjektanalysen werden für die Landstraße 3 MANOVAS berechnet. Als unabhängige Faktoren gehen die Fahrumgebung 2-fach gestuft (Simulator vs. Real) und die Müdigkeitsstufe 3-fach gestuft (grün, gelb, rot) ein (Tabelle 52). Die Auswertung erfolgt auf Basis der Fahrdaten, wobei die gleichen Parameter wie in den vorangegangenen Analysen verwendet werden (Kapitel 4.3.3).

Bevor die durchgeführten Berechnungen dargestellt werden, wird für die Realfahrtstudie gezeigt, wie sich die Anzahl an 10-Minutenabschnitten auf der Landstraße in Abhängigkeit der Messqualität verringert.

Tabelle 52: Studiendesign und Verteilung der Müdigkeitswerte in den beiden Studien auf der Landstraße unter Einschränkung der Messqualität.

| Fahrumgebung | Müdigkeitsstufe | | | Σ |
|--------------|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| | Grün | Gelb | Rot | |
| Simulator | 27 | 105 | 37 | 169 |
| Real | 45 (110) | 54 (106) | 8 (14) | 107 (230) |
| Σ | 82 (137) | 159 (211) | 45 (51) | 276 (399) |

Anmerkung: Werte in Klammer sind vorhandene Daten ohne Berücksichtigung der Datenqualität.

Wie aus Tabelle 52 zu entnehmen ist, ist im Simulator keine Verringerung der Daten zu beobachten. Für die Realfahrt hingegen kommt es zu einer Verringerung um mehr als 50 % an Daten, wenn man die korrekte Erkennung der Spurmarkierung als Messgrundlage heranzieht. Diese Abnahme verteilt sich nahezu gleich auf alle drei Müdigkeitsstufen. Diese Einschränkung wird, wie bereits in den Berechnungen für

die Autobahn, nur für die Spurhaltemaße angewandt. Die Berechnungen für die Lenkradwinkel- und Geschwindigkeitsmaße können ohne Datenverlust erfolgen.

4.8.1 Substichprobenbeschreibung

Da sich durch die Extraktion der reinen Landstraßenfahrten wieder eine neue Stichprobe ergibt, wird diese kurz beschrieben.

Das durchschnittliche Alter der Versuchspersonen ($n = 54$, 24 weiblich) liegt bei 34.9 (SD = 13.4) Jahren. Die durchschnittliche Schlafdauer in der Nacht vor dem Versuch beträgt 6.9 Stunden (SD = 1.4). Diese Schlafdauer unterscheidet sich tendenziell signifikant von der durchschnittlichen Schlafdauer der Versuchspersonen an anderen Tagen (t-test für abhängige Stichproben: $t_{(42)} = -1.38$; $p = .074$), wobei dort länger geschlafen wird (MW = 7.2; SD = 1.2). Die Wachzeit vor dem Versuch beträgt im Mittel 11.7 Stunden mit einer Standardabweichung von 2.6 Stunden.

Bezüglich der jährlichen Fahrleistung zeigt sich, dass die Teilnehmer im Schnitt 18.116 km (SD = 13.969) fahren. Die bisherige Gesamtfahrleistung liegt in dieser Stichprobe bei einem Mittelwert von 399.503 km (SD = 778.386 km) (Median = 50.000 km). Der Range der bisherigen Fahrleistung erstreckt sich von 1.500 km bis 5.000.000 km. Die Teilnehmer sind im Durchschnitt 17.37 Jahre (SD = 13.4) in Besitz einer Fahrerlaubnis der Klasse B bzw. 3. Hier zeigt sich, dass die Stichprobe in den wesentlichen Merkmalen sehr ähnlich ist, wie jene aus der Analyse auf der Autobahn.

Die Gliederung der Ergebnisse wird wieder blockweise dargestellt. Beginnend mit dem Lenkradwinkel, dann die Spurhaltung und zum Abschluss wird das Geschwindigkeitsverhalten analysiert.

4.8.2 Ergebnisse Fahrverhalten

4.8.2.1 Lenkverhalten

Als erster Parameter wird der Lenkradwinkel ausgewertet. Es findet sich ein tendenziell signifikanter Unterschied im Lenkradwinkel zwischen den beiden Fahrumgebungen. Zudem unterscheidet sich das Lenkverhalten zwischen den drei Müdigkeitsstufen ebenfalls tendenziell signifikant und es liegt eine tendenziell signifikante Interaktion vor (Tabelle 53 & Abbildung 45).

Tabelle 53: Statistische Kennwerte für den Lenkradwinkel in Abhängigkeit von Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

| Lenkradwinkel | F | df | p | η^2 |
|--|------|-------|------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 2.84 | 2/391 | .059 | .014 |
| HE Müdigkeitsstufe | 2.15 | 4/784 | .073 | .011 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 1.96 | 4/782 | .098 | .010 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 2.07 | 1/392 | .151 | .005 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 0.01 | 1/392 | .105 | .000 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 0.86 | 2/392 | .424 | .004 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 2.26 | 2/392 | .136 | .011 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Standardabweichung Lenkradwinkel | 0.86 | 2/392 | .421 | .004 |
| Absoluter Lenkradwinkel | 2.00 | 2/392 | .136 | .010 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

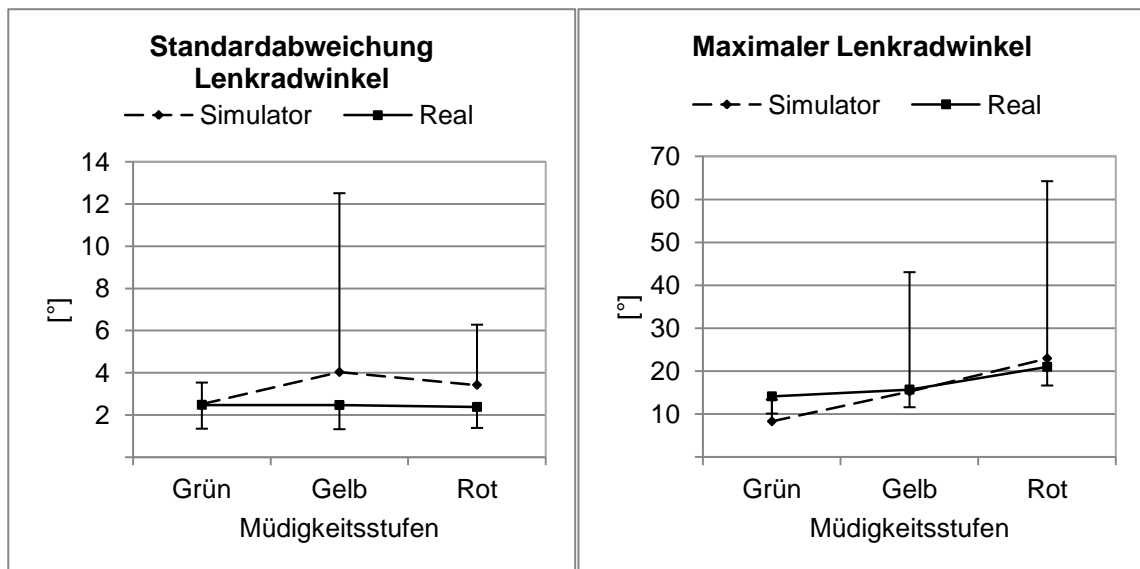


Abbildung 45: Standardabweichung und absolut größter Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Univariat ergeben sich jedoch keine signifikanten Effekte in den abhängigen Parametern zwischen den drei Müdigkeitsstufen bzw. den beiden Fahrumgebungen. Hier könnte die hohe Lenkaktivität die auf der Landstraße erforderlich ist dafür verantwortlich sein, dass keine Müdigkeitseffekte zum Tragen kommen. Allerdings ist dadurch nicht erklärbar, weshalb zwischen den beiden Fahrumgebungen keine Un-

terschiede zu finden sind. Hier könnten die Effekte vom Simulator eine entscheidende Rolle spielen. Als nächster Parameter werden die Spurhaltemaße analysiert.

4.8.2.2 Spurhaltung

Dass Müdigkeit die Spurhaltung beeinflusst, konnte bereits in den Analysen zur Autobahn dargestellt werden. Von Interesse ist hier, ob sich dieser Effekt auch auf der Landstraße findet. Da es bei den Spurhaltemaßen Einschränkungen in der Messqualität gab, wird für die genaue Anzahl an verrechneten Müdigkeitsstufen auf Tabelle 52 verwiesen (Werte ohne Klammer).

Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Spurhaltemaßen zwischen den beiden Fahrumgebungen. Zudem ergibt sich in den abhängigen Variablen ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Müdigkeitsstufen sowie eine signifikante Interaktion (Tabelle 54).

Tabelle 54: Statistische Kennwerte für die Spurhaltemaße in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Spurhaltung | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 168.67 | 4/267 | .000* | .716 |
| HE Müdigkeitsstufe | 3.91 | 8/534 | .000* | .055 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 2.28 | 8/534 | .021* | .033 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 167.96 | 1/270 | .000* | .384 |
| Standardabweichung rechter Rand | 4.87 | 1/270 | .028* | .018 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 108.31 | 1/270 | .058 | .013 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 12.17 | 1/270 | .001* | .043 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 1.63 | 2/270 | .198 | .012 |
| Standardabweichung rechter Rand | 2.17 | 2/270 | .115 | .016 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 0.95 | 2/270 | .386 | .007 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 1.10 | 2/270 | .333 | .008 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert rechter Rand | 0.73 | 2/270 | .481 | .005 |
| Standardabweichung rechter Rand | 0.98 | 2/270 | .377 | .007 |
| Absolute Abweichung rechter Rand | 0.48 | 2/270 | .617 | .004 |
| Prozentuelle Zeit < 10 cm rechten Rand | 1.17 | 2/270 | .312 | .009 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Univariat zeigt sich für den Haupteffekt Fahrumgebung folgendes Bild: Der mittlere Abstand zum rechten Rand (1.0 m vs. .65 m) sowie die Standardabweichung zum

rechten Rand (.29 m vs. .26 m) sind in der realen Fahrumgebung größer als im Simulator (Abbildung 46). Der umgekehrte Effekt zeigt sich für die prozentuellen Zeit < 10 cm zum rechten Rand (.26 % vs. 5.7 %) (TDLC). Diese Variable stellt sich in der Simulation größer dar als in der Realität (Abbildung 47).

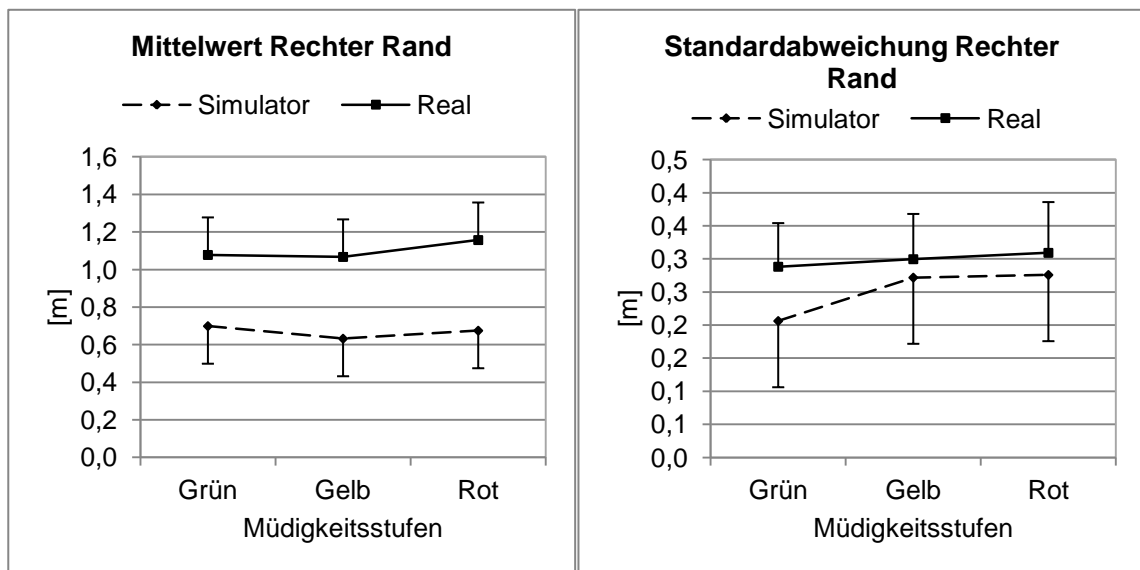


Abbildung 46: Mittlere Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

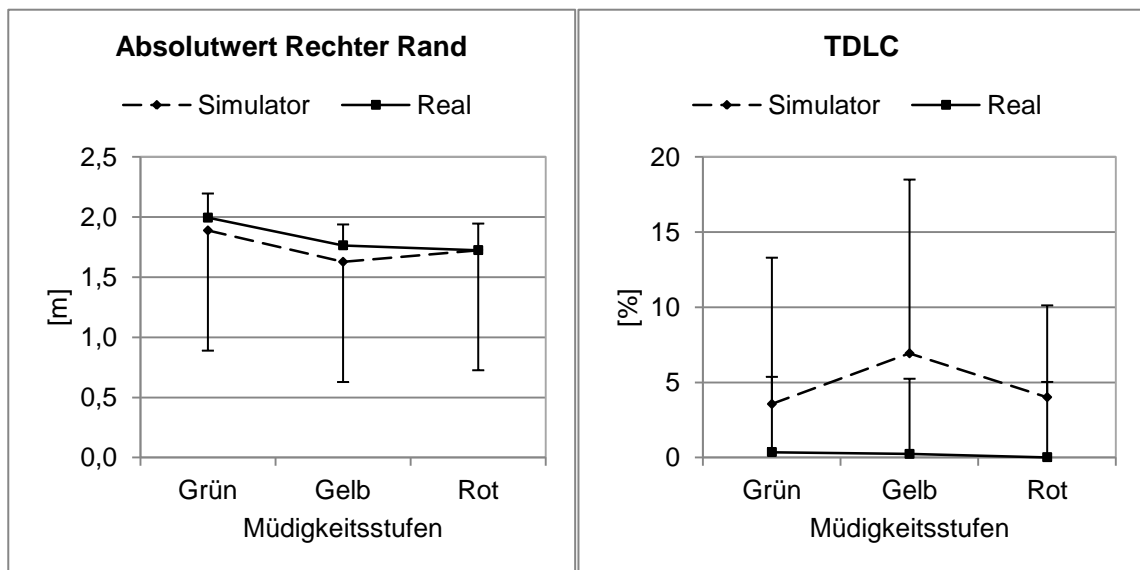


Abbildung 47: Absolute Abweichung vom rechten Rand und Zeit in Prozent <10 cm zum rechten Rand (TDLC) in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Für den Haupteffekt Müdigkeitsstufe ergeben sich univariat keine signifikanten Unterschiede, ebenso können keine signifikanten Interaktionen zwischen den beiden Variablen gefunden werden.

Die Spurhaltung zeigt hier das nahezu gleiche Bild wie auf der Autobahn. Auch hier wird in der Realität mehr Abstand vom rechten Rand gehalten und die Schwankungen fallen ebenfalls kleiner aus. Zusätzlich sind die absolute Abweichung und die Zeitdauer des Befahrens des 10 cm Abschnitts in der Realität geringer als in der Si-

mulation. Ein Nachweis, dass auf der Landstraße unterschiedliche Müdigkeitszustände zu einem unterschiedlichem Fahrverhalten führen, können hier jedoch nicht erbracht werden. Allerdings zeigt sich, zumindest deskriptiv, dass mit zunehmender Müdigkeit eine Art von Sicherheitsverhalten bei den Fahrern zu beobachten ist. Dies zeigt sich hier vor allem in der Zunahme des Abstands zum rechten Rand.

4.8.2.3 Time to Line Crossing (TLC)

Als letzter Spurhalteparameter wird für die Landstraße die Time to Line Crossing analysiert. Die Anzahl an verrechneten Müdigkeitsstufen kann wieder aus Tabelle 52 entnommen werden (Werte ohne Klammer).

Es zeigen sich für die Fahrumgebung und die Müdigkeitsstufen signifikante Effekte. Ebenso finden sich signifikante Interaktionen der beiden Variablen (Tabelle 55).

Tabelle 55: Statistische Kennwerte für das Spurhaltemaß Time to Line Crossing in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Spurhaltung | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 925.28 | 2/262 | .000* | .876 |
| HE Müdigkeitsstufe | 4.33 | 4/526 | .002* | .032 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 2.78 | 4/524 | .026* | .021 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 148.50 | 1/263 | .000* | .361 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 58.81 | 1/263 | .000* | .183 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 6.63 | 2/263 | .002* | .048 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 8.58 | 2/263 | .000* | .061 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittelwert Time to Line Crossing | 5.30 | 2/263 | .006* | .039 |
| Standardabweichung Time to Line Crossing | 5.33 | 2/263 | .005* | .039 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Für den Haupteffekt Fahrumgebung zeigen sich bei der mittleren TLC geringere Werte in der realen Fahrumgebung als in der simulierten Fahrumgebung (1.6 sek. vs. 2.1 sek.) (Abbildung 48). Die Standardabweichung zeigt in der Realität ebenfalls signifikant kleinere Werte als in der Simulation (.34 sek. vs. .59 sek.) (Abbildung 48).

Für den Haupteffekt Müdigkeitsstufen zeigt sich, dass es für die mittlere TLC zu einer Zunahme mit steigender Müdigkeit kommt (grün = 1.89 sek., gelb = 1.92 sek., rot = 1.97 sek.). Ebenso kann dies für die Standardabweichung der TLC beobachtet werden (grün = .36 sek., gelb = .52 sek., rot = .60 sek.).

Hinsichtlich der Interaktion für die Müdigkeitsstufen ergibt sich für die Standardabweichung der TLC ein signifikanter Anstieg von der grünen (.43 sek.) zur gelben (.60 sek.) sowie von der grünen zur roten (.65 sek.) Müdigkeitsstufe, jedoch nur in der Simulation. In der Realität kann keine signifikante Veränderung festgestellt werden (Abbildung 48).

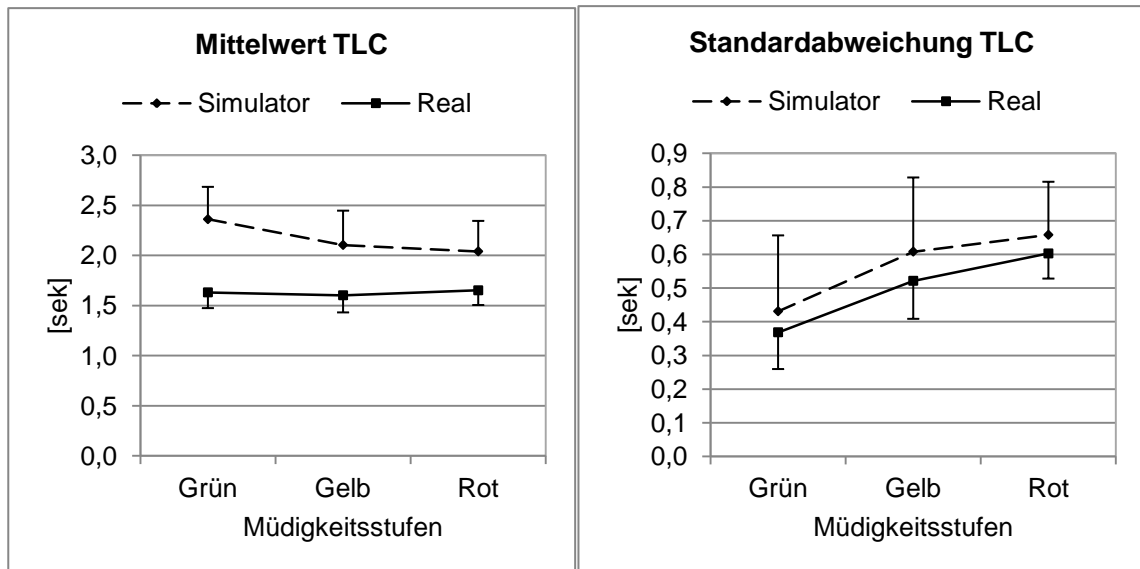


Abbildung 48: Mittlere TLC und Standardabweichung der TLC in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Desweiteren findet sich in der Simulation eine signifikante Abnahme der mittleren TLC von der grünen (2.3 sek.) zur gelben (2.1 sek.) sowie von der grünen zur roten (2.0 sek.) Müdigkeitsstufe. Dieser Effekt findet sich in der Realität nicht.

Die TLC ist gut in der Lage zwischen den beiden Fahrumgebungen zu unterscheiden, wobei die Werte in der Realität für beide Parameter (MW und SD) geringer ausfallen. Hinsichtlich der Müdigkeit finden sich für diesen Parameter nur in der Simulation Unterschiede im Fahrverhalten.

Die größeren Werte in der Simulation, sowohl für die mittlere als auch die Standardabweichung der TLC, könnten damit zusammenhängen, dass die Strecke in der Simulation relativ gerade gestaltet war. Die nicht vorhandenen Effekte der Müdigkeit in der Realität können darauf zurückgeführt werden, dass die hohe Situationsvarianz die Fahrer auf einem bestimmten Aktivitätsniveau gehalten hat. In diesem waren Müdigkeitsauswirkungen auf das Fahrverhalten im realen nicht zu beobachtbar.

4.8.2.4 Geschwindigkeitsverhalten

Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt für die Fahrumgebung, die Müdigkeitsstufen sowie eine signifikante Interaktion (Tabelle 56).

Tabelle 56: Statistische Kennwerte für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und der Müdigkeitsstufe.

| Geschwindigkeit | F | df | p | η^2 |
|--|--------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Fahrumgebung | 74.97 | 3/391 | .000* | .365 |
| HE Müdigkeitsstufe | 10.30 | 6/782 | .000* | .071 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | 8.21 | 6/782 | .000* | .058 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Fahrumgebung | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 154.63 | 1/393 | .000* | .282 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 26.70 | 1/393 | .071 | .064 |
| Maximale Geschwindigkeit | 183.35 | 1/393 | .000* | .318 |
| Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 4.08 | 2/393 | .018* | .020 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 0.66 | 2/393 | .516 | .003 |
| Maximale Geschwindigkeit | 5.89 | 2/393 | .003* | .029 |
| IA Fahrumgebung x Müdigkeitsstufe | | | | |
| Mittlere Geschwindigkeit | 0.60 | 2/393 | .547 | .003 |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | 3.39 | 2/393 | .035* | .017 |
| Maximale Geschwindigkeit | 0.08 | 2/393 | .916 | .000 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; IA = Interaktion; * = signifikant.

Univariat betrachtet unterscheidet sich die mittlere (90 km/h vs. 102 km/h) und maximale (99 km/h vs. 122 km/h) Geschwindigkeit signifikant in Abhängigkeit der Fahrumgebung, wobei unter realen Fahrbedingungen eine geringere Geschwindigkeit gefahren wird. Tendenziell signifikante Unterschiede finden sich für die Standardabweichung der Geschwindigkeit, wobei diese in der Realität (4.8 km/h) geringer ausfällt als in der simulierten (7.8 km/h) Fahrumgebung.

Für den Haupteffekt Müdigkeit zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Müdigkeitsstufen für die mittlere (grün = 91 km/h, gelb = 98 km/h) und maximale (grün = 101 km/h, gelb = 112 km/h) Geschwindigkeit. Es findet sich ein tendenziell signifikanter Anstieg der Müdigkeit von der grünen zur gelben Müdigkeitsstufe (Abbildung 49). Die gleiche Richtung des Effektes findet sich auch in der maximalen Geschwindigkeit, wobei es hier ebenfalls zu einem signifikanten Anstieg zwischen der grünen und gelben Stufe kommt (Abbildung 49).

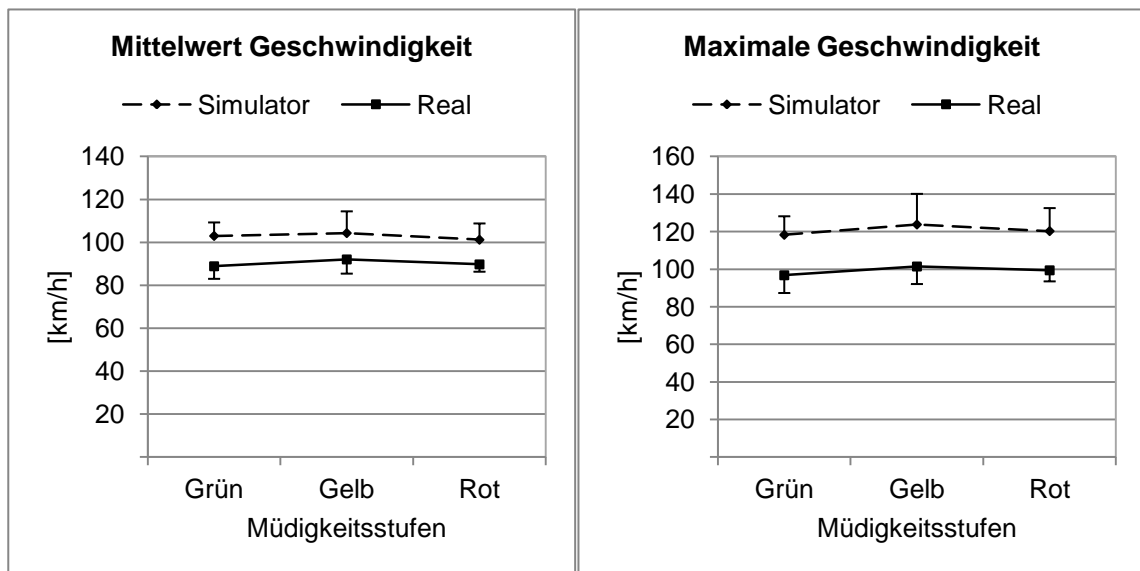


Abbildung 49: Mittlere und maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

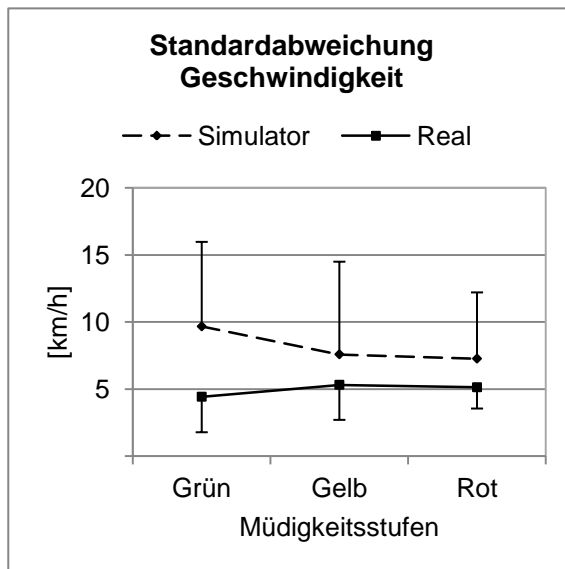


Abbildung 50: Standardabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrumgebung und Müdigkeitsstufe.

Für die Standardabweichung der Geschwindigkeit zeigt sich eine signifikante Interaktion. In der realen Fahrumgebung kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Standardabweichung von der grünen (4.4 km/h) zur gelben Stufe (5.3 km/h). Zusätzlich unterscheiden sich beide Fahrumgebungen in der grünen und gelben Müdigkeitsstufe signifikant, jedoch nicht in der roten. (Abbildung 50).

Für die Geschwindigkeitsparameter ergeben sich somit zwischen den beiden Fahrumgebungen Unterschiede, wobei in der Realität langsamer gefahren wird als in der Simulation, sowohl im Mittel als auch im Maximalwert. Zudem fallen die Geschwindigkeitsschwankungen in der Realität geringer aus als im Simulator. Der Müdigkeitseinfluss findet sich vorwiegend zwischen den wachen und müden Fahrern, wobei die müden Fahrer schneller fahren. Auch hier zeigt sich, ähnlich wie auf der

Autobahn, jenes Verhalten der Fahrer wider, welches zu einer Erschwerung der Fahraufgabe führt. Dies zeigt sich hier in der Erhöhung der Geschwindigkeit.

4.8.3 Diskussion Landstraße

Die Berechnungen für die Landstraße erfolgten getrennt von den Analysen der Autobahn. Hierfür gab es einige Gründe. Einer der Hauptgründe für die getrennte Analyse war, dass die Situation der Landstraße mit jener der Autobahn nicht zu vergleichen ist. Dies ergibt sich aufgrund der hohen Anforderungen, die die Landstraße an den Fahrer stellt. Hier sind grundsätzlich mehr Aktivitäten zu setzen wie z.B. mehr Lenkaktivität, vermehrt Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, usw. Zudem zeigte sich nach Durchsicht der Rohdaten, dass bei einer geforderten Messqualität die Datengrundlage auf der Landstraße nicht ausreichte, um eine abhängige Analyse zu berechnen. Zudem gibt es bis dato in der Literatur kaum Befunde über das Fahrverhalten unter Müdigkeitseinfluss auf der Landstraße. Daher wurde dieser Teil mit untersucht, jedoch von den Hauptanalysen separiert, um erste Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich das Fahrverhalten unter Müdigkeitseinfluss auf der Landstraße verändert. Der Vergleich dieser Verhaltensänderung auf Autobahn und Landstraße steht hierbei nicht im Vordergrund. In dieser Diskussion sollen diese Ergebnisse hinsichtlich der Müdigkeits- und der Fahrumgebungseffekte diskutiert werden.

Auf den Lenkradwinkel lässt sich auf der Landstraße kein generell signifikanter Einfluss der Müdigkeit nachweisen. Dies könnte daran liegen, dass die Landstraße aufgrund der Straßenführung grundsätzlich mehr Lenkaktivität des Fahrers erfordert und so die Müdigkeitseinflüsse überdeckt werden. Diese erhöhte Lenkaktivität würde auch den nicht vorhandenen Unterschied zwischen der realen und simulierten Landstraße erklären, wobei in der Simulation die Erhöhung der Lenkaktivität aufgrund der schlechten bzw. verzögerten Rückmeldung durch den Simulator zustanden kommen könnte. Für die erhöhte Lenkaktivität in der realen Umgebung könnte die Streckenführung verantwortlich sein.

Für die Spurhaltung zeigt sich, dass sich der Mittelwert und die Standardabweichung der TLC signifikant unter Müdigkeitseinfluss veränderten. Während der Mittelwert mit zunehmender Müdigkeit sinkt, steigt die Standardabweichung, je müder die Fahrer werden. Der Grund hierfür könnte, wie bei den Autofahrten, die höhere Geschwindigkeit bei ansteigender Müdigkeit sein. Allerdings kann dieser Effekt nur in der Simulation gefunden werden. Dies könnte daran liegen, dass in der Realität die Fahrer auf der Landstraße mehr beachten müssen und sich dadurch die Ermüdung nicht so stark in der Spurhaltung abbilden kann. Für die anderen Spurparameter können keine Einflüsse der Müdigkeit gefunden werden.

Hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Fahrumgebungen (Real und Simulator) zeigt sich, dass Fahrer dazu tendieren, in der Realität eher in der Mitte der Fahrspur zu fahren und um diese Mitte auch weniger schwanken als in der Simulation. Dieses Ergebnis wird dadurch gestützt, dass die Fahrer in der Realität kaum den auf der Landstraße sehr gefährlichen Bereich < 10 cm zum rechten Rand befahren. Da es hier im Gegensatz zur Autobahn auch keinen Standstreifen gibt, hat das Befahren dieses Bereiches für die Verkehrssicherheit eine noch größere Bedeutung als auf der Autobahn, welche auch dem Fahrer bewusst sein dürfte.

Als letzter Parameter werden wieder die Geschwindigkeitswerte diskutiert. Hier zeigt sich, dass die Fahrer mit steigender Müdigkeit schneller fahren als im wachen Zustand. Dies zeigt sich für die mittlere und maximale Geschwindigkeit. Auch hier ist davon auszugehen, dass die Fahrer durch die Geschwindigkeitserhöhung die Aufgabenschwierigkeit steigern wollen (Kompensationsverhalten). Dass sie dies bewusst machten, lässt sich möglicherweise anhand des nicht signifikanten Haupteffekts der Müdigkeit in der Standardabweichung belegen. Während die Höhe der Geschwindigkeit eher der Führungsebene zuzuordnen ist, auf der hauptsächlich bewusste Regulationsprozesse stattfinden, ist die Standardabweichung eher der Stabilisierungsebene zuzuordnen. Auf dieser Ebene werden eher unbewusste, automatische Reaktionsmuster ausgeführt, welche hier durch Müdigkeit, zumindest in der Simulation, nicht beeinflusst zu sein scheinen.

Unterschiede zwischen den Fahrumgebungen finden sich für die mittlere und maximale Geschwindigkeit, sowie tendenziell auch für die Standardabweichung. Hier finden sich wieder höhere Geschwindigkeiten sowie eine größere Standardabweichung in der Simulation. Ergeben könnten sich diese Unterschiede wieder dadurch, dass in der Realität Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern nicht vermeidbar waren und diese das Geschwindigkeitsverhalten beeinflusste. Ebenso wäre es denkbar, dass die Personen in der Simulation versuchten möglichst nah an der instruierten Geschwindigkeit von 100 km/h zu fahren.

Betrachtet man nun den Müdigkeitseinfluss bzw. die Auswirkungen von Müdigkeit auf der Landstraße auf das Fahrverhalten, so zeigt sich hier folgendes Bild:

Müdigkeit äußert sich auf der Landstraße nicht in einer Veränderung des Lenkverhaltens. Um Müdigkeit auf der Landstraße zu identifizieren sollten vorrangig Spurhalteparameter (MW und SD der TLC) sowie Geschwindigkeitsparameter zum Einsatz kommen. Hier zeigen die Fahrer erhöhte Geschwindigkeiten die jedoch dazu führen, dass der zeitliche Abstand bis zum Überfahren der Fahrspur geringer wird. Aus dieser Kombination (höhere Geschwindigkeit und weniger Zeit bis die Fahrspur verlassen wird) kann sich für den Fahrer auf der Landstraße eine kritische Situation ergeben, indem schneller die Fahrbahn verlassen wird als dies beispielsweise auf der Autobahn der Fall ist. Auf der Autobahn hat der Fahrer im Fall einer Spurüberschreitung noch Zeit angemessen zu reagieren, diese fehlt jedoch auf der Landstraße, da hier keine Fahrspur bzw. kein Pannestreifen mehr vorhanden ist. Diese Zusammenfassung deckt sich gut mit den Ergebnissen, die im Kapitel Unfallzahlen und Müdigkeit (2.1) präsentiert wurden. Auch hier zeigt sich, dass die Landstraße als gefährlicher zu bewerten ist als die Autobahn.

Für die Entwicklung eines Assistenzsystems sollte demnach dieser Straßentyp vorrangig behandelt werden. Die gegenwärtig eingesetzte Messtechnik hat jedoch insbesondere aufgrund der oft fehlenden Spurmarkierung auf der Landstraße mit enormen Datenausfällen zu rechnen. Daher sollte in weiteren Untersuchungen zur Landstraße für aussagekräftigere Ergebnisse eine größere Stichprobe untersucht werden, um den Datenausfall auszugleichen. Zudem müssten die hier gefundenen Befunde erst gesichert und dann anschließend, nach dem gleichen Verfahren wie auf der Autobahn, ein Modell zur Müdigkeitsdetektion erstellt werden.

Nach diesem Exkurs auf die Landstraße endet hier der Teil der Fahrdatenanalyse. Wie sich in den bisher durchgeführten Analysen zeigt, gelingt es, Müdigkeit im Fahrverhalten nachzuweisen. Eine reine Fahrdatenanalyse besitzt jedoch in Bezug auf Müdigkeitsauswirkungen durchaus Schwächen. Vor allem in der Erkennung des wachen Fahrers fehlt hier eine gute Übereinstimmung zwischen den Modelldaten und den real beobachteten Daten. Um dies ausgleichen zu können, wurden in der vierten Studie zusätzlich zu den Fahrdaten Blick- und Sprachdaten erhoben. Ebenso wie bei den Fahrdaten, werden auch für die Blick- und Sprachdaten zuerst Unterschiede in den verschiedenen Müdigkeitsstufen analysiert. Im zweiten Schritt werden diese Verhaltensdaten dann zusätzlich zu den Fahrdaten für einen Müdigkeitsdetektion verwendet.

4.9 Abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens (Fahrsimulator)

In der vierten Studie (Fahrsimulator) war es möglich, Blick- und Sprachdaten synchron mit den Fahrdaten aufzuzeichnen. Dies ermöglichte es, dass Blick- und Sprachverhalten in Abhängigkeit von Müdigkeit zu untersuchen. Hierbei wurde beim Blickverhalten der Fokus auf das horizontale und vertikale Blickverhalten sowie auf die Pupillenveränderung gelegt. Das Horizontale bildet das visuelle Suchverhalten in die Verkehrsumgebung ab, wohingegen das Vertikale mehr der Geschwindigkeitsüberwachung zu zuschreiben ist. Die Pupillengröße spiegelt die zentralnervöse Aktivierung der Person wider und ist somit ebenfalls ein Gradmesser für Müdigkeit. Zusätzlich zum Blickverhalten, wurden die Müdigkeitsäußerungen der Personen mit einem Mikrofon aufgenommen welche ebenfalls ausgewertet wurden.

Diese Parameter (horizontales und vertikales Blickverhalten, Pupillengröße und Sprachverhalten) werden auf Unterschiede zwischen den Müdigkeitsstufen hin untersucht. Berechnet werden hierfür drei 3-faktorielle (3 Müdigkeitsstufen) Varianzanalysen mit Messwiederholung (Tabelle 57). Anzumerken ist, dass die Bildung der Müdigkeitsstufe nur auf Grundlage der Selbstreferenzierung der Müdigkeit stattgefunden hat. Gründe hierfür waren, dass sich durch die Analyse des Müdigkeitsreferenzierungssystem gezeigt hat, dass die Übereinstimmung zwischen Selbst- und Fremdreferenzierung gut ist. Zudem waren die notwendigen finanziellen Mittel für eine Fremdreferenzierung nicht vorhanden. Die Zusammensetzung der Stichprobe wurde bereits in Kapitel 3.5.7 beschrieben

Tabelle 57: Studiendesign und Anzahl an vorhandenen Datensätzen je Müdigkeitsstufe.

| | Müdigkeitsstufe (Selbstbewertung) | | | Σ |
|-----------|-----------------------------------|------|-----|-----------|
| | Grün | Gelb | Rot | |
| Simulator | 21 | 21 | 21 | 21 |

Wie sich in Tabelle 57 zeigt, können für die Analyse insgesamt 21 von ursprünglich 32 Personen verwendet werden. Grund hierfür ist, dass für das vorliegende abhängige Design nur diese 21 Personen in allen drei Müdigkeitsstufen vorhanden waren.

In der ersten Analyse wird das horizontale Blickverhalten untersucht, da dieses die Aufmerksamkeitsverteilung in die Fahrumgebung darstellt. Die Links-Rechtsbewegung des Auges kann als „Scanverhalten“ der Fahrer interpretiert werden, um Informationen aus der Fahrumgebung aufzunehmen.

Das vertikale Blickverhalten wird verwendet, da dieser Parameter das Blickverhalten in den Fahrzeuginnenraum widerspiegelt. Hier spielt vor allem die Geschwindigkeitskontrolle eine Rolle, die sich als Blick auf den Tachometer zeigt. Erwartet wird, dass sich beide Parameter mit zunehmender Müdigkeit verändern.

Die Pupillengröße ist eine physiologische Variable und wird ausgewertet, da diese die zentralnervöse Aktivierung darstellt und in der Literatur in Zusammenhang mit Müdigkeit diskutiert wird.

4.9.1 Ergebnisse Blick- und Pupillenverhalten

4.9.1.1 Horizontales Blickverhalten

Auf Grundlage der vorliegenden Daten für die horizontale Blickbewegung ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Müdigkeitsstufen (Tabelle 58 & Abbildung 51).

Tabelle 58: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Horizontales Blickverhalten | F | df | p | η^2 |
|---|------|------|------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | .80 | 4/40 | .529 | .075 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere horizontale Blickbewegung | 1.25 | 2/20 | .307 | .111 |
| Standardabweichung der horizontalen Blickbewegung | .20 | 2/20 | .815 | .020 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt.

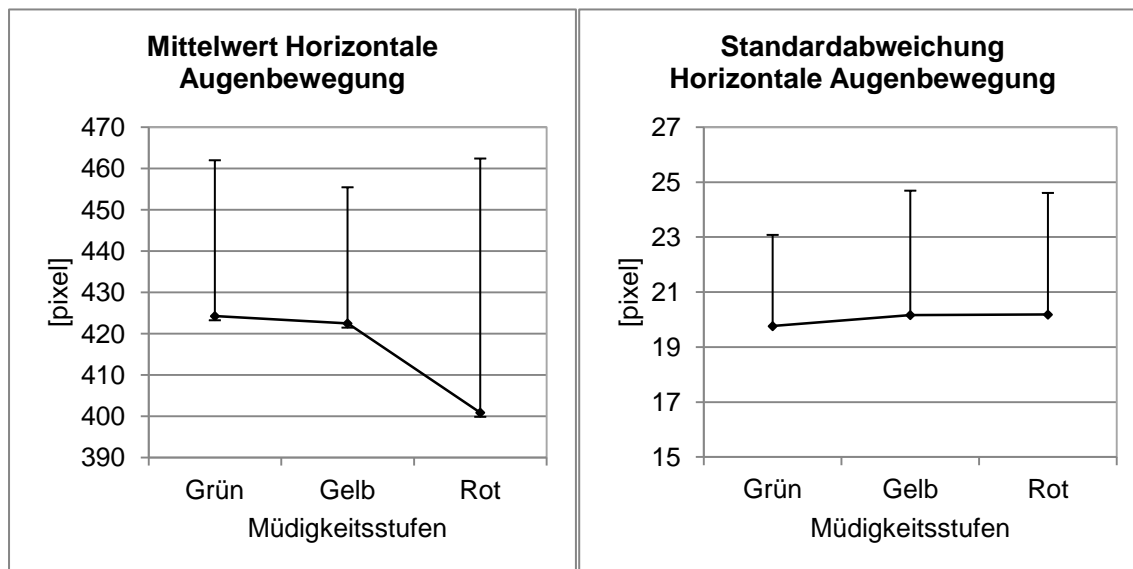


Abbildung 51: Mittlere horizontale Augenbewegung und Standardabweichung der horizontalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Deskriptiv betrachtet zeigt sich ein Absinken der mittleren horizontalen Augenbewegung, jedoch ohne statistische Relevanz.

4.9.1.2 Vertikales Blickverhalten

Als nächster Parameter wird das vertikale Blickverhalten analysiert. Hier zeigen sich tendenziell signifikante Unterschiede in Abhängigkeit der drei Müdigkeitsstufen (Tabelle 59).

Tabelle 59: Statistische Kennwerte für das vertikale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Vertikales Blickverhalten | F | df | p | η^2 |
|---|------|------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | 2.55 | 4/40 | .053 | .204 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere vertikale Blickbewegung | 6.53 | 2/20 | .007* | .395 |
| Standardabweichung der vertikalen Blickbewegung | .58 | 2/20 | .569 | .055 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; * = signifikant.

Für den Haupteffekt Müdigkeitsstufe zeigt sich, dass es zu einem signifikanten Anstieg der mittleren vertikalen Blickbewegung von der grünen (289 px) zur roten (308 px) Müdigkeitsstufe kommt. Des Weiteren kann ein tendenzieller Anstieg von der gelben (300 px) zur roten Müdigkeitsstufe gefunden werden. Für die Standardabweichung der vertikalen Blickbewegung zeigen sich keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 52).

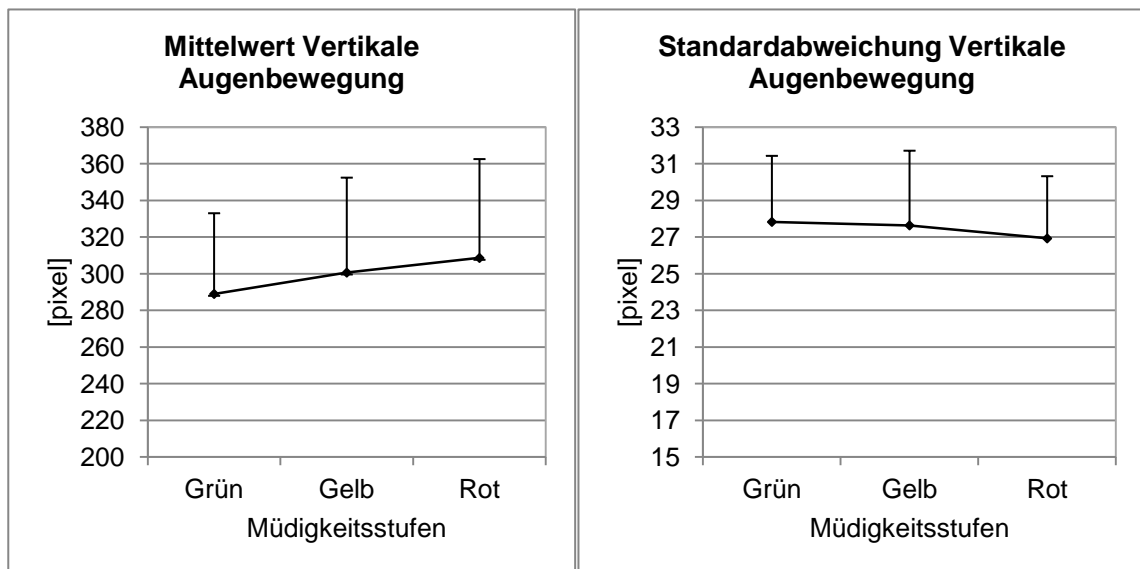


Abbildung 52: Mittlere vertikale Augenbewegung und Standardabweichung der vertikalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Aus den vorliegenden Daten lässt sich eine Veränderung des vertikalen Blickverhaltens mit zunehmender Müdigkeit nachweisen. Die Fahrer zeigen mehr vertikale Augenbewegung mit zunehmender Müdigkeit. Diese könnte sich dadurch ergeben, dass die Fahrer mit zunehmender Müdigkeit die Kopfposition veränderten und dadurch die höheren Werte zustande kommen.

4.9.1.3 Pupillengröße

Als letzter Parameter wird die Veränderung der Pupillengröße analysiert. Es zeigen sich signifikante Unterschiede in der Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeit (Tabelle 60).

Tabelle 60: Statistische Kennwerte für die Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Pupillengröße | F | df | p | η^2 |
|--------------------------------------|------|------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | 3.20 | 4/40 | .022* | .243 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere Pupillengröße | 4.20 | 2/20 | .030* | .296 |
| Standardabweichung der Pupillengröße | 1.70 | 2/20 | .207 | .146 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; * = signifikant.

Es ergibt sich eine tendenziell signifikante Verringerung in der mittleren Pupillengröße von der gelben (2713 px) zur roten (2622 px) Müdigkeitsstufe. Hinsichtlich der Standardabweichung können keine signifikanten Unterschiede gefunden werden (Abbildung 53).

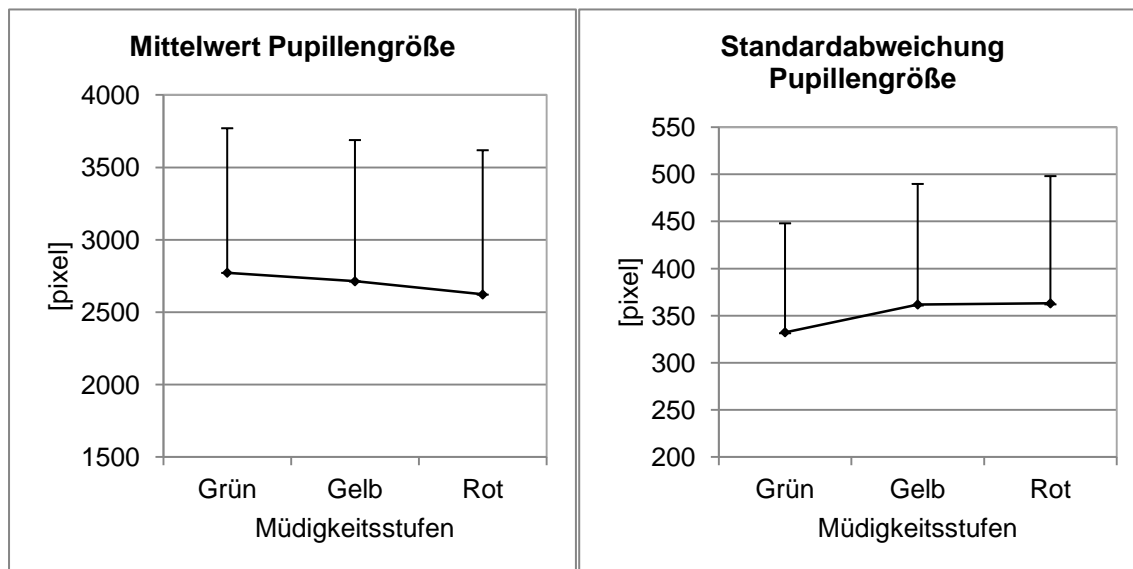


Abbildung 53: Mittlere Pupillengröße und Standardabweichung der Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Insgesamt zeigt sich, dass sich mit zunehmender Müdigkeit die mittlere Pupillengröße verringert, es findet sich jedoch keine statistisch relevante Veränderung der Standardabweichung der Pupillengröße. Dieser Wert der Standardabweichung bzw. der daraus errechnete Pupillen-Unruhe-Index wird in der Literatur als müdigkeitssensitiv beschrieben. Dies kann hier nicht bestätigt werden. Interessant ist jedoch, dass die mittlere Pupillengröße mit zunehmender Müdigkeit sinkt. Dies lässt sich mit der abnehmenden zentralnervösen Aktivierung der Fahrer erklären.

4.9.2 Ergebnisse Sprachverhalten

Zusätzlich zu den Blickparametern war es in Studie 4 möglich, Sprachdaten aufzuzeichnen und auszuwerten. Diese wurden aufgenommen, da es bereits einige Arbeiten über den Zusammenhang von Müdigkeit und Veränderung im Sprachverhalten gibt. Analysiert wurde die Veränderung der Länge der Wortäußerungen zwischen den drei Müdigkeitsstufen. Die verwendeten Differenzwerte beziehen sich hierbei auf die Differenz der am Anfang der Untersuchung erhobenen Müdigkeitsäußerungen zu den jeweils korrespondierenden in den drei Müdigkeitsstufen. Beispiel: Müdigkeitsäußerung (z.B. wach „0“) vor dem Versuch hatte eine Dauer von 0.3 Sekunden, während des Versuches gleiche Äußerung eine Dauer von 0.35 Sekunden = Differenz 0.05 Sekunden. Berechnet wird eine 3-faktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf dem Faktor Müdigkeitsstufe.

Es zeigt sich eine tendenziell signifikante Veränderung der Wortlängendifferenz in Abhängigkeit der vorliegenden Müdigkeitsstufe ($F_{(2/14)} = 3.09$; $p = .077$; $\eta^2 = .307$).

Betrachtet man die paarweisen Vergleiche, so zeigt sich eine tendenziell signifikante Verlängerung der Wortäußerungen zwischen der gelben (.22 sek.) und roten (.28 sek.) Müdigkeitsstufe (Abbildung 54).

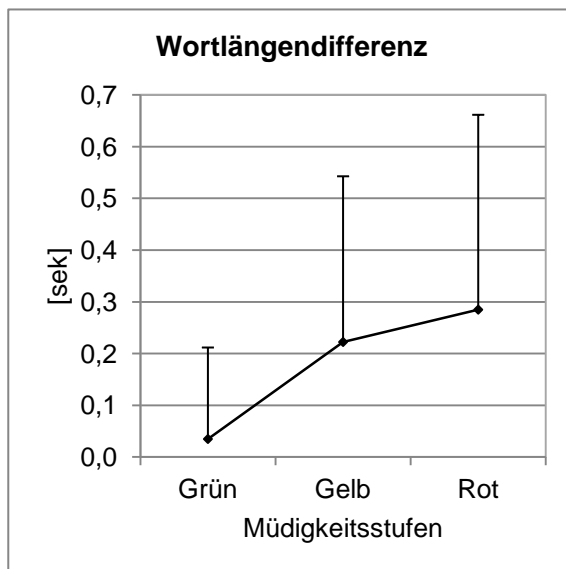


Abbildung 54: Wortlängendifferenz in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Wie zu erwarten, verlängert sich mit zunehmender Müdigkeit die Dauer, die für die Wortäußerung benötigt wird. Wie schon bereits in der Pupillengröße gezeigt wurde, finden sich diese Unterschiede ebenfalls nur zwischen den gelben und roten Müdigkeitsstufen.

4.9.3 Diskussion abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens

Durch die Aufnahme der Blick- und Sprachdaten sollte die Möglichkeit geschaffen werden, zusätzlich zu den Fahrdaten weitere Parameter für die Müdigkeitserkennung verwenden zu können.

Insgesamt zeigt sich für die Blick- und Sprachparameter, dass mit zunehmender Müdigkeit eine Veränderung eintritt. Diese konnte für die mittlere vertikale Augenbewegung und die mittlere Pupillengröße festgestellt werden, wobei der erste Parameter mit steigender Müdigkeit zunahm, der zweite Parameter hingegen sank.

Die Zunahme der mittleren vertikalen Augenbewegung könnte man folgendermaßen erklären: Personen legen den Kopf mit zunehmender Müdigkeit weiter nach hinten, um die Nackenmuskulatur in dieser mehrstündigen Fahrt zu entlasten. So braucht es längere Blicksprünge, um die relevanten Informationen – in diesem Falle – primär die Geschwindigkeitsanzeige, abzulesen. Eine weitere Interpretation wäre noch, dass die Personen ein sehr starkes Anzeichen von Müdigkeit zeigen, das Augenrollen. Dadurch wäre ebenfalls eine Vergrößerung der vertikalen Augenbewegung erklärbar.

Hinsichtlich der Pupillengröße zeigt sich eine Verringerung der Pupille mit zunehmender Müdigkeit. Diese Veränderung lässt sich mit der Reduzierung der Aktiviertheit der Personen erklären, da dies eine typische physiologische Reaktion auf Müdigkeit ist und sich im Pupillendurchmesser abbildet.

Als letzter Parameter wurde die Veränderung in der Sprache betrachtet. Diese wurde erhoben, da zukünftige Systeme zunehmend über Sprache bedient werden können und somit diese Äußerungen auch für die Detektion des Fahrerzustands interessant werden.

Die errechnete Wortlängendifferenz zeigt eine Erhöhung der Differenz vom wachen zum müden Zustand. Da die Abfrage der Müdigkeit eine innere Reflexion des eigenen Zustands widerspiegelt, kann dieser Veränderung der Wortlängendifferenz nicht nur einer verlangsamten motorischen Produktion des Wortes zugrunde liegen, sondern es könnten auch motivationale Aspekte eine Rolle spielen die zu einer längeren Wortäußerung führen könnten. Dies könnte z.B. durch die immer wiederkehrende Abfrage der Müdigkeit bedingt sein, oder auch durch die Dauer der Untersuchung.

Zusammenfassend ergibt sich für die Blick- und Sprachdaten ein durchaus interessantes Bild. So zeigt der eher motorische Parameter (Sprache) eine Verlangsamung mit steigender Müdigkeit, wohingegen sich der vertikale Blicksprung erhöht. Auch die Abbildung der Aktiviertheit der Personen über den Pupillendurchmesser und somit den Grad der Müdigkeit, scheint ein vielversprechender Ansatz zu sein.

Diese Analysen sollten auf Basis einer abhängigen Messung vorrangig prüfen, ob sich Fahrer über Ihren Müdigkeitszustand hinweg verändern. Hierfür wurde der individuelle Anteil durch das gewählte Verfahren konstant gehalten.

In einer weiteren Analyse wird nun ein anderer methodischer Ansatz gewählt, um den Einfluss von Müdigkeit – unabhängig von den individuellen Veränderungen zu testen. Analog zur Fahrdatenanalyse wurde dieselbe Stichprobe nochmals nach einem unabhängigen Versuchsdesign verrechnet.

4.10 Unabhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens (Fahr-simulator)

Wie auch in der abhängigen Messung, wurden auch hier die Blick- und Sprachdaten aus Studie 4 (Simulator) ausgewertet. Die Anzahl in den jeweiligen Müdigkeitsstufen und das Studiendesign kann aus Tabelle 61 entnommen werden. Berechnet werden drei MANOVAs mit den Müdigkeitsstufen als unabhängige Variable und den Blick- und Sprachdaten als abhängige Variablen.

Tabelle 61: Studiendesign und Anzahl an Daten in der jeweiligen Müdigkeitsstufe.

| | Wertelabel | Anzahl Zeitabschnitte |
|------------------------------------|------------|-----------------------|
| Müdigkeitsstufe (Selbst-bewertung) | Grün | 113 |
| | Gelb | 197 |
| | Rot | 140 |
| Σ | | 390 |

4.10.1 Ergebnisse Blickverhalten

4.10.1.1 Horizontales Blickverhalten

Auf Grundlage der vorliegenden Blickdaten für die horizontale Blickbewegung ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Müdigkeitsstufen (Tabelle 62).

Tabelle 62: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Horizontales Blickverhalten | F | df | p | η^2 |
|---|-------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | 9.07 | 4/774 | .000* | .045 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere horizontale Blickbewegung | .52 | 2/387 | .595 | .003 |
| Standardabweichung der horizontalen Blickbewegung | 16.23 | 2/387 | .000* | .077 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; * = signifikant.

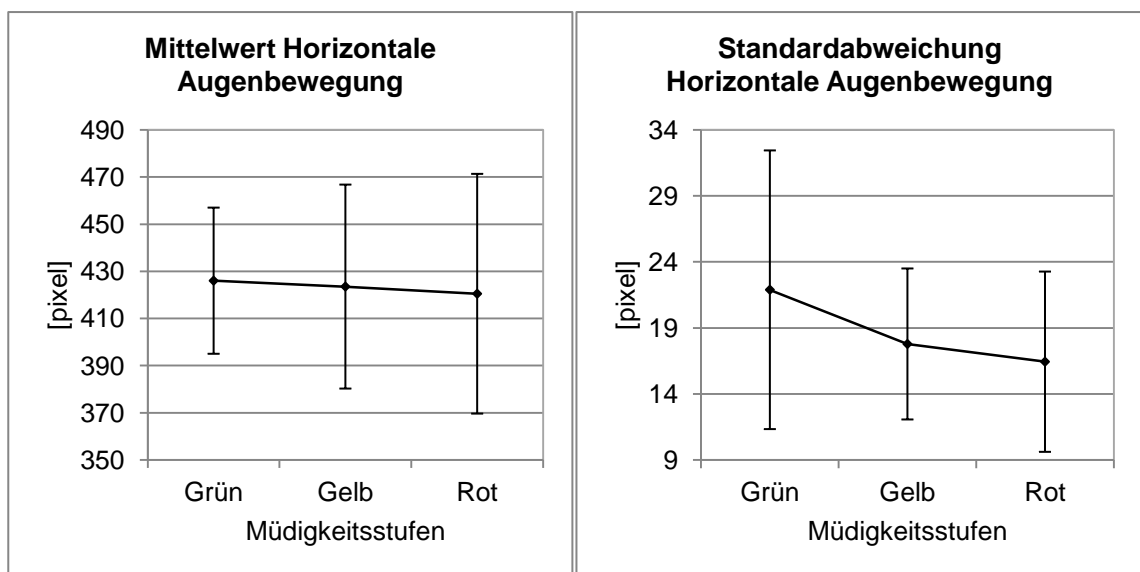


Abbildung 55: Mittlere horizontale Augenbewegung und Standardabweichung der horizontalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Univariat betrachtet zeigt sich, dass es zu einer signifikanten Abnahme in der Standardabweichung des horizontalen Blickverhaltens von der grünen (21.8 px) zur gelben (17.7 px) sowie von der grünen zur roten (16.4 px) Müdigkeitsstufe kommt. Andere Effekte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe können nicht gefunden werden. Dieses Ergebnis ist durchaus unerwartet. Erwarten würde man, dass sich die Mittelwerte verändern, nicht jedoch die Standardabweichungen, welche mehr das individuelle Verhalten widerspiegeln. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass es durch die Aufnahme jedes einzelnen Wertes zu einer Vergrößerung der Varianz gekommen ist, welche letztendlich für das Ergebnis verantwortlich ist.

4.10.1.2 Vertikales Blickverhalten

Multivariat zeigt sich ein signifikanter Effekt der Müdigkeitsstufen auf das vertikale Blickverhalten (Tabelle 63).

Tabelle 63: Statistische Kennwerte für das horizontale Blickverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Vertikales Blickverhalten | F | df | p | η^2 |
|---|-------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | 15.39 | 4/774 | .000* | .074 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere vertikale Blickbewegung | 5.64 | 2/387 | .004* | .028 |
| Standardabweichung der vertikalen Blickbewegung | 26.04 | 2/387 | .000* | .119 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; * = signifikant.

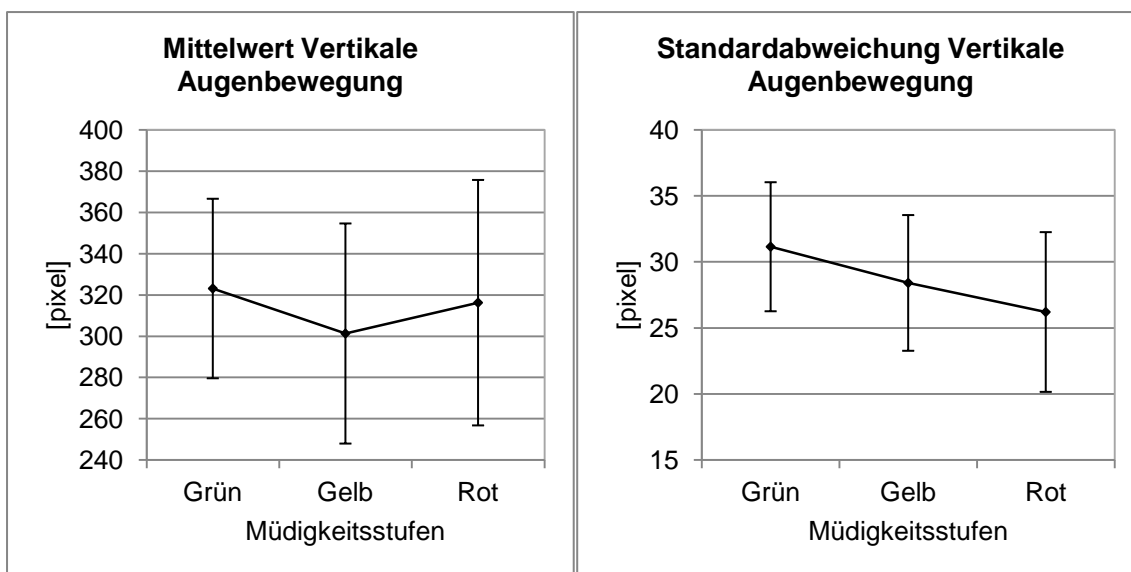


Abbildung 56: Mittlere vertikale Augenbewegung und Standardabweichung der vertikalen Augenbewegung in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Univariat betrachtet zeigt sich, dass es zu einer signifikanten Abnahme in der mittleren vertikalen Augenbewegung von grün (323 px) zu gelb (301 px) sowie zu einem signifikanten Anstieg von gelb zu rot (316 px) kommt.

Für die Standardabweichung zeigt sich, dass diese über die Müdigkeitsstufen hinweg signifikant absinkt (grün = 31 px, gelb = 28 px, rot = 26 px). Hierbei unterscheiden sich alle drei Müdigkeitsstufen signifikant voneinander.

Insgesamt zeigt sich für das horizontale und vertikale Blickverhalten, dass die Standardabweichung sensibler auf den Müdigkeitsgrad reagierte, wobei mit zunehmender Müdigkeit die Abweichungen für die horizontal Augenbewegung zuerst absinkt und dann wieder steigt. Die Standardabweichung zeigt hingegen einen durchgehend abwärtsgerichteten Trend. Auch hier bleibt der Einfluss der Kopfbewegung auf die Veränderung der mittleren vertikalen Augenbewegung denkbar. Damit einher geht eigentlich die Standardabweichung, allerdings zeigt sich hier, dass die Fahrer im sehr müden Zustand anscheinend nicht mehr den „weiten Weg“ zur Geschwindigkeitsanzeige zurücklegen wollen, was sich in einer Verringerung der Standardabwei-

chung zeigt. Zudem deckt sich diese Ergebnis auch sehr gut mit der höheren Geschwindigkeit in diesem Müdigkeitszustand.

4.10.1.3 Pupillengröße

Als letzter Parameter wird die Veränderung der Pupillengröße analysiert. Es zeigt sich multivariat keine signifikante Veränderung der Pupillengröße in Abhängigkeit der vorliegenden Müdigkeitsstufe (Tabelle 64).

Tabelle 64: Statistische Kennwerte für die Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

| Pupillengröße | F | df | p | η^2 |
|--------------------------------------|------|-------|-------|----------|
| MULTIVARIAT | | | | |
| HE Müdigkeitsstufe | 1.60 | 4/774 | .171 | .008 |
| | | | | |
| UNIVARIAT | | | | |
| Mittlere Pupillengröße | .56 | 2/387 | .570 | .003 |
| Standardabweichung der Pupillengröße | 2.79 | 2/387 | .062* | .014 |

Anmerkung: HE = Haupteffekt; * = signifikant.

Univariat zeigt sich ein tendenziell signifikanter Anstieg in der Standardabweichung der Pupille von der gelben (425 px) zur roten (482 px) Müdigkeitsstufe (Abbildung 57).

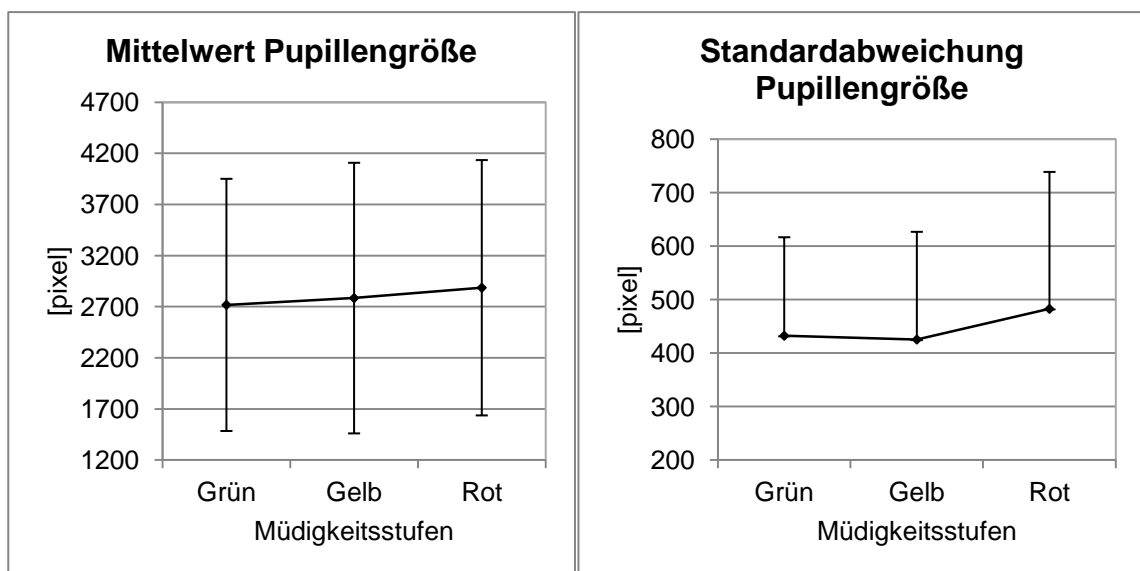


Abbildung 57: Mittlere Pupillengröße und Standardabweichung der Pupillengröße in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Für die mittlere Pupillengröße können univariat keine signifikanten Effekte gefunden werden.

Im Unterschied zur abhängigen Messung, in der sich die mittlere Pupillengröße zwischen den drei Müdigkeitsstufen unterscheidet, ist es in der unabhängigen Mes-

sung die Standardabweichung der Pupillengröße, die sensitiv auf Müdigkeit reagiert und mit zunehmender Müdigkeit größer wird. Dies könnte sich dadurch erklären lassen, dass mit zunehmender Müdigkeit die Pupille öfter abdeckt wird. Dadurch kommt es bei einer Wiederöffnung des Augenlids zu einer Weitung der Pupille, was diese Schwankungen erklären könnte.

4.10.2 Ergebnisse Sprachverhalten

Es zeigt sich eine tendenzielle Zunahme der Wortlängendifferenz ($F_{(2/346)} = 23.60$; $p = .000$; $\eta^2 = .120$) in Abhängigkeit der vorliegenden Müdigkeitsstufe, wobei Personen die sehr müde (rot = .31 sek.) sind länger für die Äußerung brauchen als dies bei wachen (grün = .09 sek.) Personen zu finden ist (Abbildung 58).

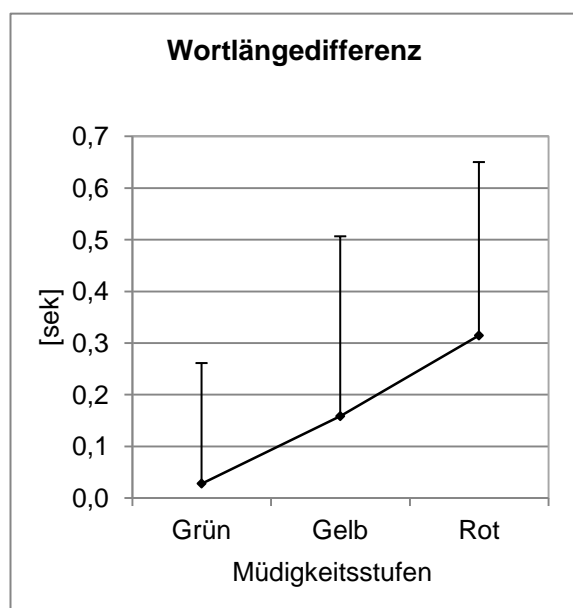


Abbildung 58: Wortlängendifferenz in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufe.

Insgesamt zeigt sich, dass die Personen mit zunehmender Müdigkeit langsamer sprechen. Betrachtet man Abbildung 58 so zeigt sich außerdem bei den müden Fahrern eine größere Streuung im Vergleich zu wachen Fahrern. Auch hier findet sich wieder der Effekt der längeren Sprachproduktion. Ebenso könnten dies auch kognitive Auswirkungen sein, da die Personen erst ihren Zustand reflektieren müssen und dies unter Müdigkeit länger dauert, wodurch sich die Verlängerung erklären würde.

Wie sich hier darstellt, ist es auch nach diesem unabhängigen Auswertungsplan möglich, verschiedenartige Müdigkeitszustände zu unterscheiden. Zudem ist es möglich, durch die Verhaltensdaten auch die gelbe und rote Müdigkeitsstufe, zumindest in einigen Parametern, zu unterscheiden.

Nachfolgend werden diese Ergebnisse diskutiert, wobei der Fokus auf den Vergleich der beiden Berechnungsmethoden liegt.

4.10.3 Diskussion unabhängige und abhängige Datenanalyse des Blick- und Sprachverhaltens

Wie bei den Fahrdaten, werden auch für die Verhaltensdaten hinsichtlich der Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsverfahren besprochen. Zuerst werden die Blickbewegungen und die Pupillenveränderung besprochen, dann das Sprachverhalten. Zum besseren Überblick über die Ergebnisse wird vorab eine tabellarische Gegenüberstellung der ausgewerteten Parameter gezeigt (Tabelle 65).

Tabelle 65: Gegenüberstellung der Veränderung von Blick- und Sprachparameter in Abhängigkeit der verwendeten Berechnungsmethode.

| Parameter | Gleicher Verlauf in beiden Berechnungen | Müdigkeitssensitiv | Personenunabhängig | Personenabhängig |
|--|---|--------------------|--------------------|------------------|
| Mittelwert horizontale Augenbewegung | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| Standardabweichung horizontale Augenbewegung | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Mittelwert vertikale Augenbewegung | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Standardabweichung vertikale Augenbewegung | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Mittelwert Pupillengröße | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Standardabweichung Pupillengröße | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Wortlängendifferenz | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Für die mittlere horizontale Augenbewegung lässt sich weder in der abhängigen noch in der unabhängigen Messung ein Effekt der Müdigkeit nachweisen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Fahrer bei Dunkelheit fahren und die Umgebung sehr monoton war. Dies führte in weiterer Folge dazu, dass selbst die wachen Fahrer wenig Aufmerksamkeit für die Verkehrsumgebung zeigten. Zusätzlich wurde auf jeglichen umgebenden Verkehr verzichtet, woraus sich auch keine Notwendigkeit ergab in der Verkehrsumgebung auf andere Objekte zu achten.

Allerdings zeigt sich, dass in der Standardabweichung der horizontalen Augenbewegung in der unabhängigen Messung eine tendenzielle Zunahme mit steigender Müdigkeit stattfindet. Die Frage ist, ob dies wirklich ein Effekt der steigenden Müdigkeit ist. Ein Grund dafür könnte auch das Erhebungsverfahren der Müdigkeitswerte sein: Die Müdigkeitsskala wurde am oberen Ende der Simulation eingeblendet. Der Wert „wach“ war links, der Wert „sehr stark müde“ ganz rechts der Skala verankert. Eventuell ergab sich mit zunehmender Müdigkeit auch eine „Suche“ nach dem eigenen Müdigkeitsstatus auf der Skala, der mit zunehmender Müdigkeit auch weiter rechts lag. So könnte sich eine höhere Standardabweichung der horizontalen Blickbewegung ergeben. Dieser Verlauf findet sich in der abhängigen Messung jedoch nicht. Ein Grund hierfür könnte die Mittelwertbildung für die jeweilige Müdigkeitsstufe sein, da dadurch ein Teil der Streuung verringert wird.

Die vertikale Augenbewegung, welche vorrangig den Blick ins Cockpit und das Ablesen der Müdigkeitsskala widerspiegelt, zeigt für den Mittelwert einen Anstieg mit zunehmender Müdigkeit, jedoch nur in der abhängigen Messung. Möglicherweise hat dies mit der individuellen Veränderung der Geschwindigkeitskontrollblicke in das Cockpit zu tun. In der unabhängigen Messung findet sich hingegen in der Standardabweichung ein Anstieg mit höheren Müdigkeitswerten. Dies könnte sich aufgrund einer veränderten Kopfposition ergeben. Zusätzlich unterscheidet sich die Pixelanzahl als Größe für die Pupille sehr stark. So beträgt diese in der abhängigen Messung ca. 28 Pixel, in der Unabhängigen hingegen ca. 60 Pixel. Auch hier könnte wieder die Mittelwertbildung für diesen Unterschied verantwortlich sein.

Somit ergibt sich zwischen den beiden Berechnungsmethoden hinsichtlich des Blickverhaltens kein eindeutiges Bild. Geht man davon aus, dass es keine Messartefakte sind, welche für die Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden verantwortlich sind, so könnte man sagen, dass die mittlere Augenbewegung eher intraindividuell auf Müdigkeit reagiert, wohingegen die Standardabweichung horizontal als auch vertikal eher auf die interindividuellen Unterschiede der Müdigkeit sensitiv reagiert. Interessant ist auch, dass es durch diese Verhaltensdaten möglich ist, die beiden höheren Müdigkeitsstufen zu unterscheiden. Dies war in den Fahrdaten kaum möglich. Dies könnte daran liegen, dass die erhobenen Daten „direkter“ gemessen werden als die Daten im Fahrsimulator bzw. im Realfahrzeug und so auch kleine Veränderungen noch abgebildet werden können.

Die Veränderung der Pupille als Maß der Aktiviertheit der Personen zeigt bei beiden Berechnungsmethoden den gleichen Verlauf, allerdings unterscheiden sich die signifikanten Effekte der Müdigkeit. In der abhängigen Messung wird eine Verringerung des mittleren Pupillendurchmessers mit zunehmender Müdigkeit beobachtet. Dies könnte sich durch die Verringerung des Aktivierungsniveaus der Personen ergeben. Dass dieser Parameter nur in der abhängigen Messung eine Signifikanz erreichte, zeigt die individuelle Abhängigkeit des Aktivierungsniveaus. In der unabhängigen Messung zeigt sich eine Zunahme der Standardabweichung. Dieser Befund spiegelt auch zum Teil den PUI wieder. Auch dort werden die Personen in vorgegebene Grenzen eingeteilt. Dieses Vorgehen kann durch das hier vorliegende Ergebnis gestützt werden, da auch hier die SD nur in der unabhängigen Messung signifikant wurde.

Als letzter Parameter wurde noch die Wortlängendifferenz zwischen den beiden Analyseverfahren verglichen. Hier findet sich in beiden Berechnungen zum einen der gleiche Verlauf, zum anderen auch der gleiche Effekt, nämlich das mit steigender Müdigkeit die Personen längere Zeit brauchen um die Wortäußerung zu tätigen. Dies scheint also eine über die Personen hinweg wirksamer, genereller Effekt zu sein, der sich durch die langsamere Sprachproduktion erklären lässt. Zudem könnte der Effekt auch dadurch entstehen, dass in den höheren Müdigkeitsstufen die kognitive Verarbeitung der Informationen (Müdigkeitsskala, subjektives Empfinden) langsamer wird. Das Ergebnis der Pupillenveränderung stützt zudem diese Annahme.

Wie sich aus diesen Unterschieden ergibt, ist es mit den Parametern möglich, verschiedene Müdigkeitszustände zu unterscheiden. Zudem ist es auch möglich, die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zu diskriminieren. Diese Befunde legen nahe, dass

eine Müdigkeitsdetektion mit den Blick- und Sprachdaten durchaus erfolgsversprechend sein könnten. Ob dies tatsächlich so ist, wird im nächsten Kapitel geprüft.

4.11 Müdigkeitsdetektion durch Analyse von Fahr- Blick- und Sprachverhalten (Fahrsimulator)

Der Fokus liegt hier darauf, eine mögliche Verbesserung der Müdigkeitsdetektion durch Hinzunahme der Blick- und Sprachdaten zu analysieren bzw. aufzuzeigen. Berichtet werden hier die Zuordnungsergebnisse zu den einzelnen Müdigkeitsstufen (Gruppierungsvariable) sowie die standardisierten kanonischen Diskriminanzkoeffizienten um einen Überblick über die Wichtigkeit der einzelnen Variablen zur Gruppentrennung zu ermöglichen. Zur Veranschaulichung einer möglichen Verbesserung wird zuerst die Müdigkeitsdetektion nur auf Grundlage der Fahrdaten berichtet, im zweiten Schritt werden dann die Blick- und Sprachdaten hinzugenommen.

Für die Berechnung (Diskriminanzanalyse) wird wieder die gleiche Stichprobe verwendet wie in der Analyse der Blick- und Sprachdaten (Kapitel 4.9). Hierbei werden sämtliche Daten der Personen herangezogen, unabhängig davon, in wie vielen Müdigkeitsstufen die Person vertreten war.

4.11.1 Müdigkeitsdetektion durch Fahrverhaltensanalyse

Tabelle 66 gibt einen Überblick über die Verteilung der Müdigkeitsstufen. Zu erkennen ist, dass in der grünen Müdigkeitsstufe die geringste Zellenbesetzung vorhanden ist, in der gelben mit knapp 200 10-Minutenabschnitten hingegen die höchste Zellenbesetzung zu finden ist.

Tabelle 66: Anzahl 10-Minutenabschnitte je Müdigkeitsstufe.

| | Wertelabel | Anzahl Zeitabschnitte |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|
| Müdigkeitsstufe (Selbstbewertung) | Grün | 113 |
| | Gelb | 197 |
| | Rot | 140 |
| Σ | | 450 |

Durch die aufgenommen Fahrdaten ist eine signifikante Trennung der Müdigkeitsstufen durch die Diskriminanzfunktion möglich ($\chi^2_{(22)} = 77.7$; $p = .000$; Wilks-Lambda = .816). Des Weiteren können durch die Funktion 88 % der Varianz aufgeklärt werden.

Betrachtet man die standardisierten Variablen, geordnet nach Diskriminierungskoeffizient, so zeigt sich, dass die mittlere Geschwindigkeit am meisten zur Trennung der Gruppen beiträgt (Tabelle 67), gefolgt von den Standardabweichungen und der maximalen Geschwindigkeit. Die Spurhalteparameter mittlere Abweichung vom rechten Rand und die Standardabweichung dieses Parameters folgen den Geschwindigkeitsparametern. Mit nur noch ca. 10 % des Trennungswertes der Geschwindigkeitsparameter geht der neu berechnete Wert TDLC ein.

Tabelle 67: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für Fahrdaten im Fahrsimulator.

| Parameter | Koeffizient |
|---------------------|-------------|
| Geschwindigkeit MW | 1.063 |
| Geschwindigkeit SD | 1.031 |
| Geschwindigkeit Max | .558 |
| Rechter Rand MW | .415 |
| Rechter Rand SD | .318 |
| Lenkradwinkel ABS | .235 |
| TLC SD | .217 |
| TLC MW | .174 |
| Lenkradwinkel SD | .140 |
| Rechter Rand ABS | .139 |
| TDLC < 10 cm | .122 |

Wie sich hier zeigt, ist die Wichtigkeit der Variablen für die Trennung der Gruppen im Simulator ähnlich wie jene in der realen Verkehrsumgebung (vgl. Tabelle 37). Auch hier tragen die Geschwindigkeitsparameter am meisten zur Trennung bei, wobei zusätzlich auch der standardisierte Wertebereich in beiden Fahrumgebungen ähnlich hoch ist.

Im nächsten Schritt wird die Zuteilung zu den drei Müdigkeitsstufen vorgestellt. Durch die Variablen ist eine richtige Klassifizierung zu 49.0 % möglich (Tabelle 68). Für die Kreuzvalidierung ergibt sich ein Ergebnis von 46.4 % an richtigen Zuordnungen.

Tabelle 68: Klassifizierungsergebnisse der Fahrparameter für die drei Müdigkeitsstufen.

| | | | Vorhergesagte Müdigkeitsstufe | | | |
|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|------|------|-------|
| | | Müdigkeitsstufe | grün | gelb | rot | Σ |
| Beobachtet | Anzahl | grün | 50 | 50 | 13 | 113 |
| | | gelb | 23 | 72 | 42 | 137 |
| | | rot | 14 | 57 | 69 | 140 |
| | % | grün | 44.2 | 44.2 | 11.5 | 100.0 |
| | | gelb | 16.8 | 52.6 | 30.7 | 100.0 |
| | | rot | 10.0 | 40.7 | 49.3 | 100.0 |
| Kreuzvalidiert | Anzahl | grün | 47 | 53 | 17 | 113 |
| | | gelb | 26 | 66 | 45 | 137 |
| | | rot | 14 | 58 | 68 | 140 |
| | % | grün | 41.6 | 46.9 | 11.5 | 100.0 |
| | | gelb | 19.0 | 48.2 | 32.8 | 100.0 |
| | | rot | 10.0 | 41.4 | 48.6 | 100.0 |

Anmerkung: Fett dargestellt sind die korrekten Klassifizierungen.

Betrachtet man Tabelle 68 so zeigt sich, dass die Zuordnung in allen drei Gruppen relativ gleich gut erfolgt. Jeweils ungefähr 50 % der Fahrer werden richtig zugeteilt. Vergleich man dieses Ergebnis mit jenem aus der Realfahrt, so sind sich beide ziemlich ähnlich. Unterschiede finden sich hier vorwiegend in der Zuteilung der wachen Fahrer in die entsprechende Gruppe. Dies kann in der Realität mit fast 80-%iger Wahrscheinlichkeit richtig erfolgen, in der Simulation jedoch nur zu etwas mehr als 40 %. Allerdings zeigt sich auch, dass nach der Kreuzvalidierung das Ergebnis im Simulator deutlich stabiler bleibt (49 % vs. 46 %) als in der Realität (72 % vs. 39 %).

Wie auch in den vorangegangenen Diskriminanzanalysen werden auch hier die gelbe und rote Müdigkeitsstufe wieder zusammengefasst. Hierdurch soll eine bessere Vergleichbarkeit mit den bisherigen Analysen hergestellt werden, zudem es dadurch auch möglich, die exakte Sensitivität und Spezifität zu berechnen.

Fasst man die beiden Stufen zusammen, so ergibt sich folgendes Bild (Tabelle 69).

Tabelle 69: Beobachtet und berechnete Müdigkeitsstufe für die Fahrparameter, gelb und rot zusammengefasst.

| | | Müdigkeitsstufe berechnet | | |
|----------------------------|------------|---------------------------|--------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | Σ |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 50 | 63 | 113 (44.2 %) |
| | gelb & rot | 37 | 240 | 277 (86.6 %) |
| Σ | | 87 (57.4 %) | 303 (79.2 %) | 390 |

Es zeigt sich (Tabelle 69), dass die wachen Fahrer nicht gut erkannt werden können (44 %). Für die müden Fahrer fällt bei dieser 2-Gruppenbetrachtung das Ergebnis sehr gut aus. Hier werden ca. 87 % richtig als müde klassifiziert.

In dieser Simulatorstudie zeigt sich ähnliches wie bereits in der Realfahrtstudie. In Beiden konnten die müden Fahrer relativ sicher korrekt klassifiziert werden. Dies spricht für den Beleg, dass sich das Fahrverhalten von müden Autofahrern ähnlich verhält. Für die wachen Fahrer zeigt sich hingegen in der Realfahrt eine höhere korrekte Klassifizierung (83 %) im Vergleich zur Simulatorfahrt (44 %). Die geringe Trefferquote könnte sich hier dadurch ergeben, dass in der Simulation mehr Variabilität im Fahrverhalten möglich ist, als im Realverkehr.

Im nächsten Auswertungsschritt werden nun zu den vorhandenen Fahrdaten noch zusätzlich die Blick- und Sprachdaten mit in die Analyse aufgenommen um zu prüfen, ob dadurch eine Verbesserung der Müdigkeitsdetektion erfolgen kann. Die Datengrundlage für die Berechnung bleibt, bis auf einige Ausnahmen, die Selbe.

4.11.2 Müdigkeitsdetektion durch Analyse des Fahrverhaltens sowie des Blick- und Sprachverhaltens

Hierbei ergibt sich eine Änderung in der Anzahl der Fälle die in die Analyse aufgenommen werden können (Tabelle 70). Dies kommt dadurch zustande, da durch den Müdigkeitseinfluss die Pupille teilweise verdeckt war, und so diese Daten nicht ausgewertet wurden. Hier zeigt sich, dass es gegenüber der Analyse mit nur Fahrdaten (Werte in Klammer in Tabelle 70) zu einer geringfügigen Verringerung der 10-Minutenabschnitte kommt.

Tabelle 70: Anzahl 10-Minutenabschnitte in der jeweiligen Müdigkeitsstufe.

| | Wertelabel | Anzahl Zeitabschnitte |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|
| Müdigkeitsstufe (Selbstbewertung) | Grün | 107 (113) |
| | Gelb | 125 (197) |
| | Rot | 117 (140) |
| Σ | | 349 (450) |

Anmerkung: Werte in Klammer repräsentieren die Anzahl der Fahrdaten.

Durch die aufgenommen Fahr- und Verhaltensdaten ist eine signifikante Trennung der Müdigkeitsstufen durch die Diskriminanzfunktion möglich ($\chi^2_{(36)} = 198.62$; $p = .000$; Wilks-Lambda = .555). Des Weiteren können durch die Funktion 91 % der Varianz aufgeklärt werden.

Insgesamt zeigt sich für die verwendeten Variablen, dass die Verhaltensparameter für die Diskriminierung der Gruppen wichtiger sind als die Fahrdaten (Tabelle 71). Für die standardisierten Variablen, geordnet nach Diskriminierungskoeffizient zeigt sich, dass die Wortlängendifferenz den größten Beitrag zur Diskriminierung der drei Müdigkeitsgruppen liefert. Gefolgt wird dieser Parameter von der Standardabweichung der Geschwindigkeit und der horizontalen Augenbewegung. Der Beitrag der Pupillengröße (sowohl Mittelwert als auch Standardabweichung) zur Gruppentrennung liegt nur im Mittelfeld. Der geringste Beitrag zur Trennung der Müdigkeitsstufen stammt von der mittlere TLC sowie der horizontale Augenbewegung.

Tabelle 71: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für Fahr- Blick- und Sprachdaten im Fahrsimulator.

| Parameter | Koeffizient |
|------------------------------|-------------|
| Wortlängendifferenz | .625 |
| Geschwindigkeit SD | .534 |
| Horizontale Augenbewegung SD | .531 |
| Geschwindigkeit MW | .530 |
| Vertikale Augenbewegung MW | .457 |
| Vertikale Augenbewegung SD | .397 |
| Rechter Rand MW | .389 |
| Pupillenfläche MW | .353 |
| Rechter Rand ABS | .338 |
| Pupillenfläche SD | .336 |
| Lenkradwinkel ABS | .329 |
| Geschwindigkeit Max | .314 |
| Rechter Rand SD | .280 |
| TLC SD | .267 |
| TDLC < 10 cm | .171 |
| Lenkradwinkel SD | .144 |
| TLC MW | .074 |
| Horizontale Augenbewegung MW | .052 |

Im nächsten Schritt wird wieder die Zuteilung zu den drei Müdigkeitsstufe betrachtet. Hier zeigt sich, dass eine richtige Klassifizierung der Gruppen in 62.5 % der Fälle möglich ist. Nach der durchgeführten Kreuzvalidierung ergibt sich immer noch eine richtige Zuordnung von 55.6 % zu den drei Gruppen.

Tabelle 72: Klassifizierungsergebnisse der Fahrdaten gemeinsam mit den Blick- und Sprachdaten für die drei Müdigkeitsstufen.

| | | | Vorhergesagte Müdigkeitsstufe | | | |
|----------------|--------|-----------------|-------------------------------|------|------|-------|
| | | Müdigkeitsstufe | grün | gelb | rot | |
| Beobachtet | Anzahl | Grün | 68 | 32 | 7 | 107 |
| | | Gelb | 18 | 73 | 34 | 125 |
| | | Rot | 6 | 34 | 77 | 117 |
| | % | Grün | 63.6 | 29.9 | 6.5 | 100.0 |
| | | Gelb | 14.4 | 58.4 | 27.2 | 100.0 |
| | | Rot | 5.1 | 29.1 | 65.8 | 100.0 |
| Kreuzvalidiert | Anzahl | Grün | 63 | 37 | 7 | 107 |
| | | Gelb | 21 | 66 | 38 | 125 |
| | | Rot | 8 | 44 | 65 | 117 |
| | % | grün | 58.9 | 34.6 | 6.5 | 100.0 |
| | | gelb | 16.8 | 52.8 | 30.4 | 100.0 |
| | | rot | 6.8 | 37.6 | 55.6 | 100.0 |

Anmerkung: Fett dargestellt sind die korrekten Klassifizierungen.

In Tabelle 72 zeigt sich, dass es in allen drei Müdigkeitsstufen zu einer Verbesserung der Zuordnungsergebnisse kommt im Vergleich zur Analyse in der nur Fahrdaten verwendet wurden (vgl. Tabelle 68). Zudem zeigt sich, dass sowohl die wachen als auch die sehr müden Fahrer zu je 2/3 richtig zugeordnet wurden. Für die etwas müden Fahrer (gelb) sind es knapp 60 % die richtig zugeordnet werden. Erfreulich ist das Ergebnis auch nach der Kreuzvalidierung. Auch hier können jeweils rund 60 % der Fahrer richtig zugeordnet werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit mit den vorherigen Ergebnissen wird auch hier wieder die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zusammengefasst (Tabelle 73).

Tabelle 73: Beobachtet und berechnete Müdigkeitsstufe für Fahrparameter sowie Blick- und Sprachdaten gemeinsam, gelb und rot zusammengefasst.

| | | Müdigkeitsstufe berechnet | | Σ |
|----------------------------|------------|---------------------------|--------------|--------------|
| | | grün | gelb & rot | |
| Müdigkeitsstufe beobachtet | grün | 68 | 39 | 107 (63.4 %) |
| | gelb & rot | 24 | 218 | 242 (89.6 %) |
| Σ | | 92 (73.9 %) | 257 (84.8 %) | 349 |

Wie sich aus Tabelle 73 ergibt, kommt es sowohl bei den wachen als auch bei den müden Fahrern zu einer Erhöhung der richtigen Klassifizierung durch die Hinzunahme der Blick- und Sprachdaten. Für die wachen Fahrer ergibt sich ein Zugewinn von fast 20 % auf nunmehr 63 %. Das bereits schon gute Ergebnis der Klassifizierung der müden Fahrer steigt durch die zusätzlichen Blick- und Sprachdaten ebenfalls nochmals an. Hier ist jedoch nur noch ein geringer Zuwachs um ca. 3 % auf fast 90 % festzustellen. Auch hier setzt sich der Trend fort, dass das Verhalten von müden Fahrern sehr gut erkannt werden kann. Zudem können durch die Aufnahme der Verhaltensdaten auch die wachen Fahrer relativ gut korrekt erkannt werden. Dies ist wahrscheinlich damit zu begründen, dass die individuellen Unterschiede, die sich im wachen Fahrverhalten finden, in den wachen Verhaltensdaten eine gewisse Gleichheit aufweisen.

4.11.3 Diskussion Müdigkeitsdetektion durch Analyse des Fahrverhaltens sowie des Blick- und Sprachverhaltens

Diese beiden Analysen wurden durchgeführt um zu prüfen, ob durch die Aufnahme von Blick- und Sprachdaten eine Verbesserung der Müdigkeitsdetektion stattfinden kann im Vergleich zur reinen Fahrdatenklassifikation. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob es hierdurch zu einer besseren Müdigkeitserkennung der wachen Fahrer kommt. In der Diskussion werden zuerst die generellen Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten der beiden Verfahren aufgezeigt. Im Anschluss daran werden die Variablen besprochen, die für die Gruppentrennung relevant sind.

In der ersten Analyse wurde die Benchmark für die Müdigkeitsdetektion gesetzt. Diese erfolgt nur auf Grundlage von Fahrdaten. Hier zeigt sich, dass rund 50 % der Fahrer korrekt in eine der drei Müdigkeitsgruppen eingeteilt werden. Diese Werte verteilen sich auf die drei Müdigkeitsstufe relativ gleichmäßig. Zudem bleibt diese Ergebnis auch nach einer durchgeführten Kreuzvalidierung auf einem ähnlich hohen Niveau. Führt man die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zusammen, so zeigt sich, dass rund 86 % der müden Fahrer richtig erkannt wurden. Somit zeigt sich auch hier wieder, dass sich das Fahrverhalten von müden Fahrern ähnlich ist. Eine weitere Erklärung wäre, dass in dieser Studie nur die Selbstreferenzierung der Müdigkeit für die Einteilung in die Müdigkeitsstufe verwendet wurde. Diese könnte hier den wahren Wert der Person widerspiegeln, da für den Fahrer keine subjektive/objektive Gefahr für einen Unfall vorhanden war und somit die Müdigkeit zuverlässiger eingeschätzt wurde.

Allerdings war die Hauptfrage für diese Analysen ob durch die Aufnahme weiterer Daten die Detektionsqualität verbessert werden kann.

Zur Beantwortung wurden zu den vorhandenen Fahrdaten noch zusätzlich Blick- und Sprachdaten der jeweiligen Fahrer mit in die Berechnung aufgenommen. Hier zeigt sich, dass es dadurch zu einer Zunahme von fast 13 % an richtig erkannten Müdigkeitsstufen kommt. Somit kann grundsätzlich die Frage, ob Blick- und Sprachdaten einen Mehrwert für eine Müdigkeitsdetektion bringen eindeutig mit ja beantwortet werden.

Dieses Ergebnis war zu einem bestimmten Teil auch zu erwarten. Betrachtet man die Studien, die mit Sprachdaten bzw. mit Augenbewegungen Müdigkeit detektieren, so zeigen sich dort durchwegs sehr gute Ergebnisse (vgl. (Feng et al., 2009); Golz, Sommer, Trutschel, Sirois & Edwards (2010); Krajewski (2007); (Sahayadhas et al., 2012)). Die in diesen Studien vorgestellten Ergebnisse für eine korrekte Detektion eines müden Fahrers reichen von 80 % bis 99 %. Aussagen über die korrekte Erkennung eines wachen Fahrers werden hingegen nicht getroffen. In der hier durchgeführten Studie werden im Vergleich zu den in der Literatur berichteten Studien „nur“ rund 60 % an richtigen Klassifikationen erreicht. Allerdings ist zu erwähnen, dass sich dieser Wert auf alle drei Müdigkeitsstufe bezieht.

Führt man die gelbe und rote Müdigkeitsstufe zusammen, so steigt der Wert an richtig erkannten wachen Fahrern von vorher 44 % (nur Fahrdaten) auf nun 63 % (Fahr- und Verhaltensdaten) an. Die Zuteilung der müden Fahrer, die ohnehin schon sehr hoch war, steigert sich durch die Aufnahme der Blick- und Sprachdaten um nochmals ca. 3 % auf fast 90 %.

Diese Werte decken sich somit sehr gut mit jenen aus der Literatur. Zudem kann hier gezeigt werden, dass durch die Aufnahme der Blick- und Sprachdaten zu den Fahrdaten, eine Verbesserung der Müdigkeitserkennung stattfindet. Ein großer Vorteil, von fast 20 % zeigt sich hier vor allem in der Erkennung des wachen Fahrers. Demzufolge ist es durch die Verhaltensdaten möglich, den wachen Fahrer zuverlässiger zu erkennen als nur auf Grundlage der Fahrdaten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Fahrer im wachen Zustand ein ähnliches Verhalten aufzeigen bezogen auf ihr Blick- und Sprachverhalten.

Interessante Ergebnisse liefern auch die einzelnen Variablen, die zur Müdigkeitserkennung beitragen.

Eine Einordnung in die bestehende Literatur über Müdigkeit ist hier jedoch schwer. Grund hierfür ist, dass in den vorgestellten (z.B. Moller et al. (2006), Pizza et al. (2004), Risser et al. (2000)) Studien meist nur Unterschiede zwischen den Müdigkeitsstufen berichtet werden, jedoch keine Ergebnisse über eine mögliche Detektion von Müdigkeit. Darüber hinausgehend finden sich keine Berichte darüber, welcher Parameter in welcher Güte zur Trennung von Müdigkeitszuständen beiträgt. So bleibt nur ein Vergleich mit den signifikanten Parametern der vorgestellten Studien.

Die beiden von Manstetten (2008) beschriebenen Parameter (Lenkaktivität, Spurüberschreitung) zeigen hier eine eher untergeordnete Rolle für die Müdigkeitserkennung (vgl. Tabelle 67 und Tabelle 71) sowohl mit als auch ohne Blick- und Sprachdaten. Ein möglicher Grund könnte hier sein, dass die simulierte Strecke vom Verlauf gänzlich unterschiedlich zu der realen Versuchsstrecke von Manstetten (2008) war. Allerdings zeigt sich auch, dass auch in der Realfahrtstudie diese Parameter mehr eine untergeordnete Rolle spielen.

Interessanterweise zeigt sich in der hier durchgeführten Studie, dass die Geschwindigkeitsparameter einen wichtigen Beitrag zur Trennung der Müdigkeitsgruppen liefern. Bei der Berechnung in welcher nur Fahrdaten verwendet wurden, sind die Geschwindigkeitsparameter an oberster Stelle (Tabelle 67). Dass sich das Geschwindigkeitsverhalten zwischen wachen und müden Fahrern unterscheidet wurde bereits in der Literatur des Öfteren berichtet (z.B. Baulk et al., 2008; Boyle et al., 2008; Lenné et al., 1998). Hier zeigt sich meist ein Anstieg in der Geschwindigkeit (Pizza et al., 2004) jedoch auch ein Absinken einzelner Geschwindigkeitsparameter (z.B. Boyle et al., 2008) mit zunehmender Müdigkeit. Detektionsergebnisse fehlen hier allerdings. Gleich verhält es sich mit Angaben über die Wichtigkeit der Geschwindigkeitsparameter für die Erkennung von Müdigkeit. Dieser Nachweis wurde in vorliegender Arbeit erbracht. Dass die Geschwindigkeitsparameter einen wichtigen Anteil zur Müdigkeitserkennung besitzen, zeigt sich auch in der Berechnung von Fahrdaten gemeinsam mit Blick- und Sprachdaten. Hier ist zwar die Wortlängendifferenz die wichtigste Variable, allerdings kommt danach gleich der erste Geschwindigkeitsparameter (Tabelle 71). Demzufolge hat in dieser Untersuchung die Geschwindigkeit eine wichtige Rolle für die Klassifizierung des Fahrerzustands. Auch in der Realfahrtstudie hatte das Geschwindigkeitsverhalten einen wesentlichen Einfluss auf die Gruppentrennung. Hier zeigt sich demnach sowohl in der Realität als auch in der Simulation, dass die Fahrer aktiv versuchen die Aufgabe auf ein gewisses Schwierigkeitsniveau zu bringen um der Müdigkeit entgegen zu wirken und durch dieses Vorgehen eine Detektion ermöglichen.

Zusätzlich zu den Fahrparametern wurden hier verbale Äußerungen für die Müdigkeitsdetektion herangezogen. Wie bereits Krajewski (2007) zeigen konnte, ist es durch eine Analyse des Sprachverhaltens möglich Müdigkeit zu erkennen. Zudem wurde von Whitmore und Fisher (1996) bereits bewiesen, dass eine Veränderung der Wortlänge als Indikator für Müdigkeit gesehen werden kann. Dies konnte auch in vorliegender Arbeit bestätigt werden. Jedoch wurde anders als bei Whitmore und Fisher (1996) nicht nur die reine Wortlänge, sondern die Differenz zu einer Baseline für die Müdigkeitsdetektion verwendet. Wie sich in der Diskriminanzanalyse zeigt, ist die hier berechnete Wortlängendifferenz die wichtigste Variable zur Diskriminierung der Müdigkeitsstufen. Dieses Ergebnis lässt sich auch sehr gut mit dem zentralnervösen Aktivierungsniveau der Person erklären (vgl. Dawson, Ian Noy, Härmä, Åkerstedt, & Belenky, 2011; Regen, 2009; Wilhelm, 2006). Durch die Absenkung dieses Aktivitätsniveaus kommt es zu einer verlangsamten Produktion der Wörter (vgl. Krajewski, 2007) was in weiterer Folge zu einer längeren Dauer der Wortäußerung führt.

Neben den Sprachverhalten, ist das Blickverhalten von großer Wichtigkeit für die Trennung der Müdigkeitsgruppen. Die Bewegung der Augen zur Müdigkeitsunterscheidung wurde bereits von einigen Autoren verwendet (z.B. Flores, Armingol, & de La Escalera, 2010; Schleicher et al., 2008; Takchita, Katsuya, Kazunori, & Yuji, 2002). Anders als bei den meisten Untersuchungen, wurde hier nicht die Augenbewegungen, sondern die Blickbewegung analysiert. Hier zeigt sich, dass es durch das Blickverhalten ebenfalls möglich ist, wache Fahrer zuverlässiger zu erkennen als nur mit Fahrdaten. Dies gründet vor allem darin, dass Fahrer in allen Müdigkeitsstufen ein bestimmtes Maß an Blickverhalten für die erfolgreiche Erfüllung der Fahraufgabe zeigen müssen. Im wachen Zustand wird diese von allen dadurch deutlich, dass die Fahrer relativ viel in der Fahrumgebung umher sehen und dadurch dieses Stadium gut erkennbar ist. D.h. ein aktives Blickverhalten steht demnach für einen wachen Fahrer.

5. GESAMTFAZIT

In diesem Kapitel werden die Fragestellungen dieser Arbeit beantwortet und der daraus resultierende Zugewinn an Kenntnissen über waches bzw. müdes (Fahr-)verhalten aufgezeigt. Zusätzlich werden die Schwierigkeiten in der Durchführung der empirischen Studien betrachtet. Abschließend wird ein Ausblick für zukünftige Forschungsfragen gegeben.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden durch die Aufarbeitung der Literatur große Lücken in Hinblick auf den Wissensstand über Müdigkeitsauswirkungen auf das Fahr-Blick- und Sprachverhalten aufgezeigt. Aus diesen Defiziten wurden Fragestellungen abgeleitet. Diese Fragestellungen und Herausforderungen sollen hier nochmals angeführt und dann beantwortet werden.

- 1. Müdigkeitsreferenzierung
 - Entwicklung eines subjektiven und objektiven Müdigkeitsreferenzierungssystems
- 2. Müdigkeitsauswirkungen
 - Wie wirken sich verschiedene Müdigkeitszustände auf das Fahrverhalten aus und sind diese Müdigkeitsauswirkungen personenabhängig?
- 3. Übertragbarkeit
 - Lassen sich die Ergebnisse der Fahrdaten aus der Simulation auf eine reale Fahrumgebung übertragen?
- 4. Festlegung von Grenzwerten
 - Innerhalb welcher Grenzwerte der Fahrdaten bewegt sich ein wacher bzw. müder Fahrer?
- 5. Müdigkeitsdetektion
 - Welche Parameter sind mit welcher Güte geeignet unterschiedliche Müdigkeitszustände zu erkennen?
- 6. Individuelle Parametrierung
 - Ist eine Baseline notwendig um Müdigkeit sicher zu erkennen?
- 7. Exkurs: Müdigkeitsauswirkungen auf Landstraßen
 - Welche Fahrparameter unterscheiden sich auf einer Landstraße in Abhängigkeit des Müdigkeitszustandes?
- 8. Verwendung weiterer Verhaltensdaten zur Müdigkeitsdetektion
 - Können zusätzlich zu den Fahrdaten, Sprach- Blick- und Pupillenparameter einen positiven Beitrag zu einer Müdigkeitserkennung leisten?

Aus versuchsplanerischen Gründen können die gesamten Fragestellungen nicht mit einer Untersuchung alleine beantwortet werden. Aus diesem Grund wurden vier Studien durchgeführt. Zwei davon waren Simulator- und zwei Realfahrtstudien.

(Studie 1): Die erste Fahrsimulatorstudie verfolgte zwei Ziele: (a) Es sollten in einer kontrollierten Umgebung erste Erkenntnisse über grundsätzliche Auswirkungen von Müdigkeit auf einer Landstraße sowie einer Autobahn gewonnen werden. Zur

Messung der Müdigkeitsauswirkungen ist es jedoch notwendig zu wissen, in welchem Müdigkeitszustand sich die Person gerade befindet. (b) Um diesen Müdigkeitszustand zu erfassen, wurde ein neuentwickeltes Müdigkeitsreferenzierungssystem (Kapitel 3.1), welches sowohl aus einer subjektiven wie auch einer objektiven Skala besteht, erstmals eingesetzt und einer ersten Überprüfung unterzogen.

Nachdem die Grundlage für eine zuverlässige Beurteilung des Müdigkeitszustandes der Fahrer sichergestellt war, wurden die 13 vorhandenen Stufen des Müdigkeitsreferenzierungssystems in drei Müdigkeitsstufen eingeteilt. Die Fahrer wurden entsprechend ihren Müdigkeitsanzeichen entweder in die wache (grün), mittel müde (gelb) oder sehr müde (rot) Müdigkeitsstufe eingeteilt.

Diese Einteilung war Voraussetzung für die im weiteren Schritt durchgeführten Berechnungen. Hierbei wurden jeder Müdigkeitsstufe die entsprechenden Fahrparameter zugeteilt. Durch dieses Vorgehen konnte sichergestellt werden, dass die jeweiligen Fahrparameter den entsprechenden Müdigkeitszustand des Fahrers widerspiegeln.

Zur Prüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein reales Fahrverhalten wurde eine zweite Studie im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt.

(Studie 2): Diese Studie war vom grundsätzlichen Aufbau (Länge der Autobahn und der Landstraße) gleich wie jene im Fahrsimulator. Zudem wurde auch hier wieder das neue Müdigkeitsreferenzierungsverfahren eingesetzt.

Wie sich in beiden Studien zeigte, war es durch die Verwendung von unterschiedlichen Straßentypen kaum möglich, alle drei Müdigkeitsstufen innerhalb einer Person zu induzieren. Dies stellt jedoch eine wichtige Grundlage für die Analysen dar, da sich in der Literatur (z.B. Galley et al., 2005) zeigt, dass die Auswirkungen von Müdigkeit sehr individuell sein können. Um den individuellen Anteil mittels abhängiger Analyse auszuschließen ist es erforderlich, Daten der Fahrer in allen drei Müdigkeitsstufen vorliegen zu haben.

(Studie 3): Mit dem Wissen, dass es die Verwendung von zwei unterschiedlichen Straßentypen erschwert, das Verhalten von Fahrern in allen drei Müdigkeitsstufen zu beobachten, wurde in der nächsten Studie nur eine reale Autobahn verwendet. Durch diese Studie war es nun möglich, die Anzahl an Fahrern, von denen Werte in allen drei Müdigkeitsstufen vorlagen, zu erhöhen und dadurch ein Teil der Fragestellungen zu beantworten. Zusätzlich konnte diese Datenmenge dazu genutzt werden, Grenzwerte für ein müdes bzw. waches Fahrverhalten zu erstellen.

(Studie 4): Um auch im Fahrsimulator einen derartigen Datenpool zu generieren, wurde eine weitere Studie im Simulator durchgeführt, welche ebenfalls nur aus einer Autobahnfahrt bestand. Zudem war es in dieser kontrollierten Umgebung möglich, zusätzlich zu den Fahrdaten noch Blick- und Sprachdaten der Fahrer mit aufzuzeichnen.

Um einen besseren Überblick über die einzelnen Studien und die Anzahl der jeweils aufgetretenen Müdigkeitsstufen zu ermöglichen soll Tabelle 74 herangezogen werden.

Tabelle 74: Verteilung der Müdigkeitsstufen sowie Darstellung der Verkehrsumgebungen und Straßentypen aller vier Studien.

| Studie | Straßentyp | | Verkehrsumgebung | | 10 Minutenabschnitte | | | Müdigkeitsstufe* | | | |
|----------|------------|----|------------------|-----|----------------------|------|----------|------------------|------|-----|-----|
| | LS | AB | Real | Sim | LS | AB | Σ | Grün | Gelb | Rot | VPs |
| 1 | ✓ | ✓ | | ✓ | 169 | 162 | 331 | 60 | 194 | 77 | 28 |
| 2 | ✓ | ✓ | ✓ | | 254 | 233 | 487 | 24 | 215 | 26 | 27 |
| 3 | | ✓ | ✓ | | | 476 | 476 | 83 | 243 | 150 | 25 |
| 4 | | ✓ | | ✓ | | 412 | 412 | 106 | 150 | 156 | 32 |
| Σ | | | | | 423 | 1283 | 1706 | 273 | 802 | 409 | 112 |

Anmerkung: Studie 1: 1. Simulatorstudie (Autobahn und Landstraße), Studie 2: 1. Realfahrtstudie (Autobahn und Landstraße), Studie 3: 2. Realfahrtstudie (Autobahn), Studie 4: 2. Simulatorstudie (Autobahn), LS = Landstraße, AB = Autobahn, Real = Realfahrt, Sim = Simulator, Grün = grüne Müdigkeitsstufe, Gelb = gelbe Müdigkeitsstufe, Rot = rote Müdigkeitsstufe, VPs = Anzahl Versuchspersonen.

Wie sich in Tabelle 74 zeigt, sind in allen Studien alle Müdigkeitsstufen besetzt, jedoch relativ ungleich verteilt. Anzumerken ist hier außerdem, dass die Stufen zwar besetzt sind, es jedoch v.a. in Studie eins und zwei nur ganz wenige Fahrer gab, bei denen Müdigkeitswerte in allen Stufen auftraten.

Nach diesem Überblick werden im nachfolgenden Abschnitt die Ergebnisse hinsichtlich der Fragestellungen vorgestellt.

5.1 Beantwortung der Fragestellungen

Fragestellung 1: Müdigkeitsreferenzierung

Wie sich zeigt, ist es erstmals gelungen, ein Müdigkeitsreferenzierungssystem zu erstellen, das sowohl auf einer subjektiven wie auch auf einer objektiven Ebene vergleichbare Ergebnisse liefert. Es zeigen sich noch einige Unstimmigkeiten in der Höhe der Bewertungen, vor allem in Situationen in denen die Fahrer eine hohe Aktivität zeigen. Dieses Verhalten könnte für die externen Bewerter problematisch einzuordnen sein. Hier ist noch weiterer Forschungsbedarf gegeben. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine Erklärung der subjektiven Skala gegenüber den Versuchsteilnehmern kaum notwendig ist, da der Aufbau sehr leicht verständlich ist. Durch die Verwendung einer Oberkategorie ist gewährleistet, dass die Probanden die Grobeinteilung ihres Müdigkeitszustandes intuitiv vornehmen. Durch die Unterkategorien erfolgt dann eine nochmalige Differenzierung des jeweiligen Müdigkeitszustandes der Person. Ebenfalls neu ist die feine Abstufung (13-stufig) von Müdigkeitszuständen, die bis dato in der Literatur noch nicht vorhanden ist. Durch die gleichzeitige Entwicklung des objektiven Pendantes ist es zudem gelungen auch eine objektive feingraduelle Erfassung des Müdigkeitszustandes der Person zu verwirklichen. Diese Fremdreferenzierung kann ebenfalls relativ einfach erlernt werden, da definierte Anzeichen von Müdigkeit vorliegen, die es zu bewerten gilt.

Durch diese Neuentwicklung ist ein wesentlicher Knackpunkt in der Müdigkeitsforschung beseitigt worden. Es ist nun möglich, mit einem abgesicherten Verfahren sowohl die objektive als auch die subjektive Müdigkeit zu erfassen.

Fragestellung 2 & 3: Müdigkeitsauswirkung und deren Übertragbarkeit

Da zur Beantwortung dieser Fragestellungen sehr viele Ergebnisse vorliegen, wird zur besseren Übersicht Tabelle 75 eingeführt.

Tabelle 75: Müdigkeits- und fahrumgebungssensitive Fahrparameter für die Autobahn.

| Parameter | Müdigkeitssensitiv | Unterschied Fahrumgebung | Müdigkeitsveränderung zwischen Personen | Müdigkeitsveränderung innerhalb der Person |
|------------------------------------|--------------------|--------------------------|---|--|
| Standardabweichung Lenkradwinkel | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Absoluter Lenkradwinkel | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Mittelwert rechter Rand | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Standardabweichung rechter Rand | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| Absolute Abweichung rechter Rand | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ |
| TDLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mittelwert TLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Standardabweichung TLC | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Mittelwert Geschwindigkeit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Standardabweichung Geschwindigkeit | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Maximale Geschwindigkeit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Wie sich aus Tabelle 75 entnehmen lässt, unterscheiden sich nahezu alle Fahrparameter in den unterschiedlichen Müdigkeitsstufen. Einzige Ausnahme bildet die mittlere Abweichung vom rechten Rand. Diese wird allerdings in der Literatur des Öfteren als Indikator für Unterschiede zwischen Müdigkeitszuständen erwähnt. So berichten Lenné et al., (1998) in ihrer Untersuchung, dass Fahrer nach einer Schlafdeprivation signifikant weiter links in der Spur fahren als vor einer Schlafdeprivation. Dieser Befund konnte hier jedoch nicht gezeigt werden. Dies könnte daran liegen, dass die Fahrer in vorliegender Studie nicht vom Schlaf abgehalten wurden. Es ist jedoch in den Fahrdaten - zumindest unter realen Verkehrsbedingungen - eine Tendenz Richtung links zu finden. Für die anderen Parameter zeigt sich weitestgehend eine Bestätigung der in der Literatur vorliegenden Befunde (z.B. Gimeno et al., 2006; May & Baldwin, 2009; Schleicher et al., 2008; Schmidt et al., 2010). Somit konnte mit vorliegender Arbeit bestätigt werden, dass viele in der Literatur verwendeten Parameter geeignet sind um unterschiedliche Müdigkeitszustände der Fahrer abzubilden. Ebenso konnte gezeigt werden, dass mit den vorliegenden Parametern nicht nur wache

von sehr müden Fahrern (mit Schlafentzug) zu unterscheiden sind, sondern dass auch geringere Müdigkeitszustände erfassbar sind.

Interessant ist auch das Ergebnis der Vergleichbarkeit von Simulator und realer Verkehrsumgebung. Wie sich aus Tabelle 75 entnehmen lässt, sind in nahezu allen Fahrparametern Unterschiede zwischen den beiden Fahrumgebungen zu beobachten. Nur für die absolute Abweichung vom rechten Rand und die Standardabweichung der Geschwindigkeit ergeben sich keine statistisch relevanten Unterschiede in den beiden Fahrumgebungen. Dass die Ergebnisse, abhängig vom betrachteten Fahrparameter durchaus divergieren können, wurde auch von Hallvig et al., 2013 nachgewiesen. Auch sie fanden in einem Vergleich von realer und simulierter Verkehrsumgebung, dass die Fahrer in der Realität mit zunehmender Müdigkeit stärker nach links tendieren, im Simulator hingegen nach rechts. Ebenso wurde eine Verringerung der Geschwindigkeit in der Realität mit zunehmender Müdigkeit beobachtet, im Simulator zeigte sich hingegen kaum eine Veränderung. Zudem fanden die Autoren im Simulator durchgehend höhere subjektive Müdigkeitsbewertungen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit.

Interessant sind auch die Verläufe der einzelnen Variablen im Hinblick auf Müdigkeit und Fahrumgebung. Hier zeigt sich, dass nur zwei Variablen (maximaler Lenkradwinkelausschlag und der Mittelwert der Spurabweichung) einen gegenläufigen Verlauf in den beiden Umgebungen aufzeigen. So zeigt sich für den Lenkradwinkel in der Realität ein Absinken mit zunehmender Müdigkeit, im Simulator steigt dieser Wert hingegen mit Müdigkeit an. Dies kann dadurch zustande kommen, dass die Fahrer in der Realität mit zunehmender Müdigkeit stärker nach links tendieren und sich somit von einem potenziellen Abkommen von der Fahrspur entfernen. Dadurch ist es im Realen nicht mehr notwendig, große Lenkkorrekturen durchzuführen. Dies lässt sich auch durch die grundsätzliche Spurhaltung stützen. Auch hier zeigt sich, dass die Fahrer in der Realität mehr nach links, im Simulator mehr nach rechts tendieren.

Dass die Fahrer bei zunehmender Müdigkeit ein derartiges Sicherheitsverhalten zeigen, konnte auch bei Helland et al. (2013) gezeigt werden. Die Verläufe der anderen Variablen sind sowohl in der Realität als auch in der Simulation gleich. Allerdings ist zu beachten, dass die Wertebereiche meist unterschiedlich hoch sind (vgl. Kapitel 4.3.4). Neue Erkenntnisse konnten auch in Bezug auf individuelle Einflüsse auf Müdigkeitseffekte gefunden werden. Nahezu sämtliche Parameter sind in der Lage Müdigkeitsveränderungen innerhalb der Person sowie unabhängig der Person abzubilden. Lediglich für drei Spurparameter (Mittelwert, absolute Abweichung und Standardabweichung vom rechten Rand) konnte dies nicht gefunden werden.

Frage zwei lässt sich, kurz umrissen, wie folgt beantworten:

Mit den erhobenen Fahrdaten ist eine Unterscheidung von verschiedenen Müdigkeitszuständen möglich und diese sind im Allgemeinen personenunabhängig.

Frage drei lässt sich wie folgt beantworten:

Grundsätzlich unterscheiden sich die Fahrparameter in Abhängigkeit der beiden Fahrumgebungen. Die Verläufe sind in beiden Umwelten allerdings meist ident. So-

mit ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse, unter Berücksichtigung des Wertebereiches, durchaus vorstellbar.

Zu klären bleibt allerdings noch, ob es möglich ist einen generellen „Umrechnungsfaktor“ zwischen Simulator und Realität einzuführen. Dieser würde den Vorteil bringen, dass eine Übertragbarkeit von Simulatorergebnissen auf die Realität einfacher zu handhaben wäre.

Fragestellung 4: Festlegung von Grenzwerten

Als nächste Frage war zu beantworten, welche Grenzwerte für ein waches bzw. müdes Fahrverhalten angesetzt werden sollen. Hierbei ist ein Fahrverhalten erst ab einen gewissen Punkt interessant, nämlich sowie es sicherheitskritisch wird. In der Literatur zeigt sich, dass über ein sicherheitskritisches bzw. potenziell gefährliches Fahrverhalten unter Müdigkeit keine einheitliche Meinung besteht. Zudem werden oft die Begrifflichkeiten eines müden Fahrverhaltens mit einem sicherheitskritischem Fahrverhalten vermischt. So wird z.B. von Philip et al., 2005a & b müdes Fahrverhalten so definiert, dass das gesamte Fahrzeug über die Spurmarkierung gefahren sein muss. Für Baulk et al., 2008 liegt ein müdes Fahrverhalten dann vor, wenn nur ein Rad die Spurmarkierung überragt. Wie sich hier zeigt, ist diese „Definition“ des müden Fahrverhaltens zum einen sehr weitläufig, zum anderen ist davon auszugehen, dass bereits vor dem Überfahren der Spurmarkierung riskante Situationen entstehen können. Ziel war es in dieser Arbeit demnach die Grenzwerte so zu gestalten, dass die Grenze von wachen zu müden Fahrern auch die Grenze von sicherem zu riskantem Fahrverhalten mit abdeckt. .

Da sich in den vorliegenden Analysen gezeigt hat, dass sich nahezu alle Fahrparameter zwischen den Müdigkeitsstufen unterscheiden, wurden diese auch zur Erstellung der Grenzwerte herangezogen. Als Grenzwerte wurden jeweils die Übergänge der Fahrparameter zwischen der grünen und nachfolgenden Müdigkeitsstufe definiert.

Durch diese Grenzwerte ist es erstmals gelungen, ein waches Fahrverhalten von müdem Fahrverhalten quantitativ zu trennen. Zu beachten ist hier, dass diese Werte nur für reale Autobahnen mit einer Geschwindigkeitsvorgabe von 120 km/h gelten.

Fragestellung 5: Müdigkeitsdetektion

In der Literatur werden viele Ergebnisse berichtet, wie sich das Verhalten in verschiedenen Müdigkeitszuständen unterscheidet. Studien, die eine Detektion von Müdigkeit durchführen sind jedoch kaum zu finden. Aus diesem Grund wurde in vorliegender Arbeit eine Müdigkeitsdetektion mit realen Fahrdaten durchgeführt. Hier zeigt sich, dass die Geschwindigkeitsparameter den größten Beitrag zur Müdigkeitserkennung leisten. Dies ist durchaus ein überraschendes Ergebnis, da Studien bis dato kaum Befunde darüber zeigen, dass sich Müdigkeit im Geschwindigkeitsverhalten abzeichnet (vgl. Di Stasi et al., 2012). Die Erhöhung der Geschwindigkeit bei zunehmender Müdigkeit könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Fahrer versuchen, die Aufgabe zu erschweren um sich dadurch zu aktivieren. Gefolgt werden die Geschwindigkeitsparameter von den Spurhalteparametern. Diese finden sich auch in der Literatur sehr häufig wieder (Liu et al., 2009). Interessant ist, dass meist die

SDLP für die Müdigkeitserkennung Verwendung findet. In vorliegender Arbeit ist zwar die SDLP auch an der Detektion beteiligt, der TLC kommt jedoch mehr Bedeutung zu. Auch für das Lenkverhalten finden sich im Vergleich zur Literatur konträre Befunde. Geht man von den Befunden in der Literatur aus, so sollte sich Müdigkeit gut über das Lenkverhalten (Manstetten, 2008; Merat et al., 2013; Thiffault et al., 2003) detektieren lassen. In vorliegender Studie stellt das Lenkverhalten eine untergeordnete bis kaum wahrnehmbare Rolle für die Müdigkeitsdetektion dar. Die Gründe für diese Ergebnisse sind wahrscheinlich auf die Verwendung von realen Daten zurück zu führen bzw. auf die unterschiedlichen Verrechnungsmethoden des Lenkverhaltens.

Insgesamt ergibt sich, dass Müdigkeit (ca. 77 %) relativ gut durch Fahrdaten detektiert werden kann, die Erkennung eines wachen Fahrverhaltens (ca. 76 %) leicht darunter liegt.

Fragestellung 6: Individuelle Parametrierung

Baseline ja oder nein? In der Literatur wird darüber relativ wenig berichtet. Einzelne Studien (z.B. Galley et al. 2005; Manstetten, 2008) verwenden eine Baseline in Ihren Berechnungen um das individuelle Verhalten und die darauf folgende Veränderung besser abbilden zu können. Ob dies wirklich einen Vorteil bringt, wurde jedoch noch nicht aufgezeigt. Mit vorliegender Arbeit wurde dieser Beweis erstmals angetreten. Die Müdigkeitsdetektion wurde mit und ohne Baseline gegenübergestellt um Aussagen über den Mehrwert einer Baseline zu erhalten.

Wie im Literaturteil der Arbeit berichtet, kann das Verhalten unter Müdigkeit von Person zu Person sehr unterschiedlich sein, was eine Baseline rechtfertigen würde. Die am Markt befindlichen Systeme, welche diese Methode nutzen, gewährleisten allerdings nicht, dass die erstellte Baseline auch tatsächlich von einem wachen Fahrer stammt. Dass diese ein Problem sein kann, zeigt auch vorliegende Untersuchung. Betrachtet man die hier vorliegenden Müdigkeitswerte schon zu Beginn der Fahrt, so wird schnell ersichtlich, dass die Annahme eines wachen Fahrers zu Fahrtbeginn kaum haltbar ist.

Die Ergebnisse in den Analysen mit Baseline zeigen, dass eine Detektion von müden Fahrern sehr gut (ca. 95%), die Erkennung von wachen Fahrern hingegen nicht zufriedenstellend (ca. 42%) gelingt. Geht man von diesem Ergebnis aus, so würde ein wacher Fahrer sehr oft eine Falschwarnung über seinen aktuellen Müdigkeitszustand erhalten. Dies führt in weiterer Konsequenz dazu, dass das Vertrauen in das Assistenzsystem sinkt und im schlimmsten Fall das System deaktiviert wird. Allerdings zeigt sich ohne Baseline eine zwar nicht ganz so gute Erkennung der müden Fahrer (ca. 77%), doch werden ohne Baseline die wachen Fahrer ebenfalls relativ zuverlässig (ca. 76%) erkannt. Durch diese gute Erkennung würden viele Fehlalarme vermieden werden und der Fahrer würde dem System wahrscheinlich mehr Vertrauen entgegenbringen. Damit ist die Beantwortung der Fragestellung jedoch schwierig. Die Baseline bringt durchaus Vorteile, allerdings nur in der Erkennung von müden Fahrern.

Was man für eine sinnvolle Nutzung der Baseline demnach sicherstellen müsste, ist, zu gewährleisten dass diese tatsächlich von einem wachen Fahrer stammt. Da

dies in der Realität wahrscheinlich schwer umzusetzen ist, könnte man die angeführten Grenzwerte zur Prüfung nutzen, ob der Fahrer tatsächlich wach ist. Erst wenn diese Grenzen während einer Baselinephase nicht überschritten werden, kann die Müdigkeitsdetektion auf Grundlage einer Baseline erfolgen.

Fragestellung 7: Müdigkeitsauswirkungen im Fahrverhalten auf Landstraßen

Bis dato liegen keine Untersuchungen vor, die Müdigkeitseffekte auf das Fahrverhalten auf einer Landstraße beschreiben. Wie sich in vorliegender Arbeit zeigt, ist Müdigkeit im Fahrgeschehen auf der Landstraße durchaus schwierig zu untersuchen. Dies begründet sich dadurch, dass auf der Landstraße im Vergleich zur Autobahn eine sehr viel größere Situationsvarianz herrscht und dadurch die Müdigkeitseinschätzung, sowohl subjektiv wie auch objektiv, diffizil ist. Zudem ist durch die teilweise sehr schlechte bzw. nicht vorhandene Spurmarkierung mit einem enormen Datenausfall zu rechnen. In vorliegender Arbeit liegt dieser Ausfall bei ca. 50%. Trotz dieser Umstände war es möglich, den Einfluss von Müdigkeit auf das Fahrverhalten auf einer Landstraße zu untersuchen.

Grundsätzlich zeigt sich ein ähnliches Bild wie in der Beantwortung von Frage zwei, bei der die Fahrdaten auf der Autobahn betrachtet wurden. Auch auf der Landstraße sind sämtliche Fahrparameter dazu geeignet, Unterschiede im Fahrverhalten in Abhängigkeit der Müdigkeitsstufen aufzuzeigen.

Besonders interessant ist, dass sich die Fahrer mit steigender Müdigkeit auch auf der Landstraße Richtung Spurmitte bewegen. Dies konnte auch auf der Autobahn gezeigt werden und könnte auf beiden Straßentypen als Kompensationsverhalten zur Erhöhung der Sicherheit interpretiert werden.

Betrachtet man die Ergebnisse auf der Landstraße zwischen Real und Simulation, so sind wie auf der Autobahn die Wertebereiche, also die Höhe der Ausprägungen der Fahrparameter unterschiedlich. Bezüglich der Verläufe über die Müdigkeit hinweg zeigt sich im Vergleich von realer vs. simulierter Landstraße, dass fünf von elf Fahrparametern einen unterschiedlichen Verlauf aufweisen (Maximaler Lenkradwinkel, mittlere TLC, Standardabweichung der Geschwindigkeit absolute Abweichung vom rechten Rand, TDLC).

Die Beantwortung der Frage 7 lautet somit:

Auf Landstraßen sind für die Unterscheidung von Müdigkeitszuständen grundsätzlich die gleichen Fahrparameter verwendbar wie auf der Autobahn, die Verläufe sind jedoch stark abhängig von der jeweiligen Fahrumgebung.

Fragestellung 8: Verwendung von Verhaltensdaten zur Müdigkeitsunterscheidung bzw. Müdigkeitsdetektion

Die Ausgangsfrage war, ob die Aufnahme von Blick- und Sprachdaten in die Analysen einen Zugewinn in der Müdigkeitsdetektion bringen. Dass Verhaltensdaten grundsätzlich Müdigkeitszustände unterscheiden können, wurde bereits vielfach nachgewiesen (vgl. Golz et al., 2010; Johns, 2003 Krajewski, 2007; Schleicher et al., 2008; Whitmore und Fisher, 1996). Hier zeigt sich, dass es durch Müdigkeit z.B. zu einer Abnahme der Sakkadengeschwindigkeit, der Sprachgeschwindigkeit oder der

Lidschlusshäufigkeit kommen kann. Auch in dieser Arbeit wurden im Blick- und Sprachverhalten Änderungen in Abhängigkeit der Müdigkeit gefunden. Ausgehend von der oben gestellten Frage wurde eine Analyse berechnet, in denen zu den bestehenden Fahrdaten die Blick- und Sprachdaten mit aufgenommen wurden. Diese gemeinsame Betrachtung wurde bis dato in der Literatur noch nicht durchgeführt. In vorliegender Arbeit zeigt sich, dass nur auf Grundlage der Fahrdaten eine richtige Zuordnung der Fahrer zu rund 50 % zu einer der drei Müdigkeitsstufen erfolgen kann. Nimmt man zusätzlich die Blick- und Sprachdaten in die Analyse auf, so erhöht sich dieser Wert auf rund 63 %. Diese Erhöhung ergibt sich vorrangig durch die verwendeten Sprachdaten, welche für Müdigkeit besonders sensitiv zu sein scheinen (Caraty & Montacié, 2012; Krajewski et al., 2012). Dieses gute Klassifizierungsergebnis in vorliegender Arbeit lässt sich mit der zentralnervösen Aktivierung erklären. Durch Müdigkeit kommt es zu einer Verringerung dieses Aktivitätsniveaus (Wilhelm et al., 2001, 2008), welches in weiterer Folge zu einer längeren Sprachäußerung führt.

Beantwortet man nun die Frage, ob die Aufnahme von Blick- und Sprachdaten in die Auswertung eine bessere Müdigkeitserkennung erlaubt, so ist dies eindeutig mit ja zu beantworten.

Will man nun mit einem (oder zwei) Sätzen ein Bild eines müden Fahrers (zumindest für die Autobahn) erstellen würde sich folgendes ergeben:

Der müde Autofahrer lenkt weniger, verringert den zeitlichen Abstand bis zum Überfahren der rechten Fahrspurmarkierung und zeigt größere maximale Abweichungen von dieser. Zudem versucht er seine Müdigkeit damit zu kompensieren, die Aufgabe schwieriger zu gestalten indem er seine Geschwindigkeit erhöht. Sein Sprechtempo verlangsamt sich mit zunehmender Müdigkeit. Dabei vernachlässigt er es nicht, die Verkehrsumgebung entsprechend zu beobachten, allerdings leidet seine Geschwindigkeitswahrnehmung, was durch häufigere Blicke zur Geschwindigkeitsanzeige kompensiert wird.

Dieses Verhalten lässt sich auch mit dem Müdigkeitsmodell (Abbildung 59) in Beziehung setzen, welches in Kapitel 2.3 bereits beschrieben wurde.

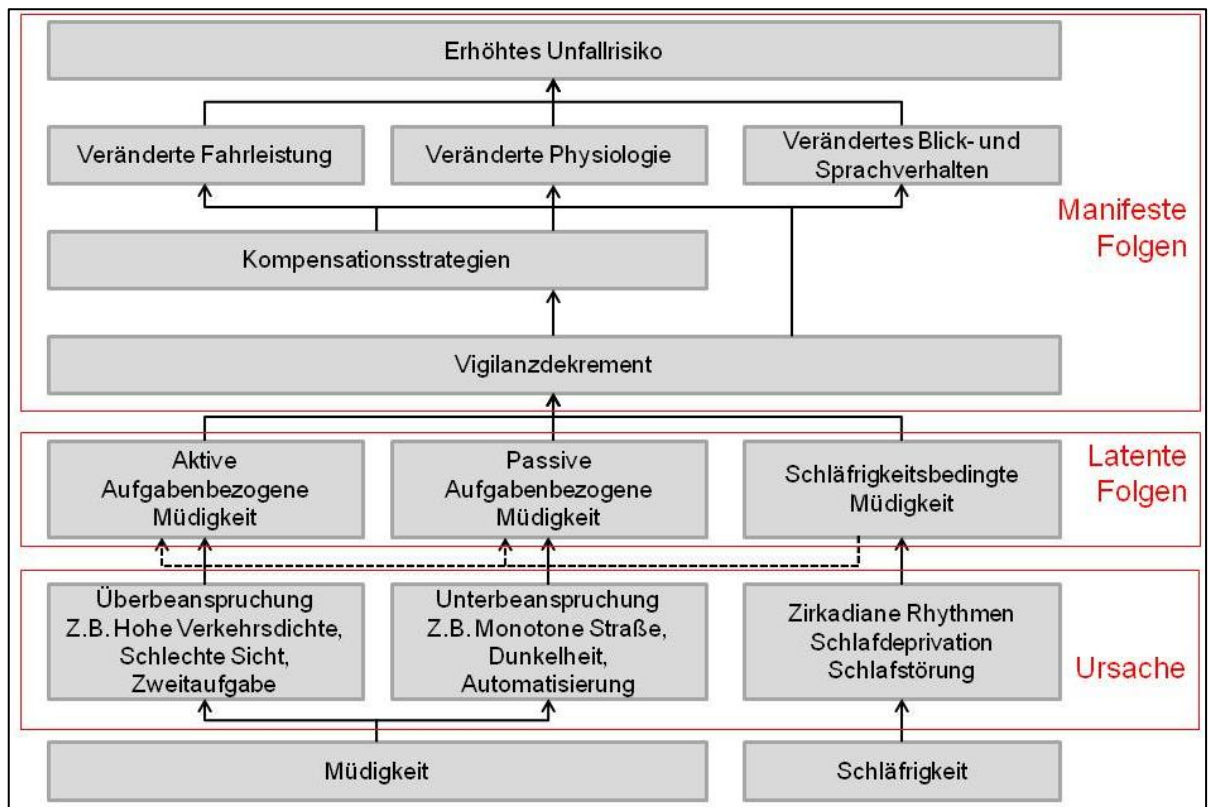


Abbildung 59: Erweitertes und modifiziertes Müdigkeitsmodell aus Schmidt (2010); May und Baldwin (2009).

Aus diesem Modell wurden im Literaturteil zunächst die unterschiedlichen Entstehungsgründe für Müdigkeit abgeleitet, Begriffsabgrenzungen und Integrationen durchgeführt sowie auf verschiedene Formen von Müdigkeit hingewiesen. Ausgehend von diesem Modell ist eine Müdigkeitserkennung erst möglich, wenn sich die Folgen von Müdigkeit im Verhalten abbilden. Eine dieser möglichen Folgen ist das Kompensationsverhalten, um welches das Modell im Zuge dieser Arbeit erweitert wurde.

Allerdings unternehmen Fahrer nicht immer Gegenmaßnahmen bzw. zeigen ein Kompensationsverhalten, um der aufkommenden Müdigkeit entgegen zu wirken, weshalb die direkte Verbindung zwischen Vigilanzdekrement und Verhaltensänderungen bestehen (Abbildung 59) bleibt. Diese beiden Annahmen können durch vorliegende Untersuchung bestätigt werden. Betrachtet man die Ergebnisse für die unterschiedlichen Müdigkeitsstufen, so zeigt sich, dass bei einigen Fahrparametern (z.B. Standardabweichung Lenkradwinkel, mittlere Geschwindigkeit) ein Verhalten gezeigt wird, das als Kompensationsstrategie bzw. Kompensationsverhalten anzusehen ist. Diese Parameter zeigen meist einen U-förmigen Verlauf. Für andere Fahrparameter (z.B. mittlere Abweichung rechter Rand) zeigt sich hingegen kein derartiges Verhalten.

Zudem kann gezeigt werden, dass dieses Kompensationsverhalten relativ früh zu beobachten ist (gelbe Müdigkeitsstufe). Dadurch besteht die Möglichkeit, das Verhalten früh zu detektieren und den Fahrer darauf aufmerksam zu machen. Diese Müdigkeitsdetektion kann mit den hier generierten Grenzwerten erfolgen, da diese aus einem realen Versuchssetting stammen und die Übertragbarkeit auf ein relativ natürli-

ches Fahrverhalten somit gegeben ist. Grundsätzlich könnte man mit diesen Grenzen ein Assistenzsystem entwickeln, welches Fahrer entsprechend einordnet und entsprechend warnt. Erst wenn der Fahrer in den ersten 10 bis 20 Minuten diese Grenzwerte nicht überschreitet, kann dieses Fahrverhalten als wach bezeichnet und als Baseline verwenden werden. Diese Baseline kann dann dafür genutzt werden, den müden Fahrer zuverlässiger zu erkennen

Somit kann diese Arbeit einen bedeutenden Beitrag für die Auslegung von Müdigkeitswarnsystemen leisten. Dies basiert auf einem besseren Verständnis von Müdigkeit und deren Auswirkungen auf den Fahrer, das ebenfalls durch diese Arbeit ermöglicht wurde. Durch die aufgezeigten Möglichkeiten zur Verrechnung relevanter Parameter in einem komplexen Müdigkeitsmodell wird es vorstellbar, ein Assistenzsystem zu entwickeln welches durch eine korrekte Rückmeldung eine hohe Akzeptanz durch den Fahrer erfährt.

Ob die Fahrer auf eine eventuelle Rückmeldung ihres Müdigkeitszustandes auch tatsächlich reagieren oder nicht, liegt in deren Gefahrenbewusstsein. Selbst die zuverlässigste und valideste Warnung bringt nur dann einen Gewinn für die Verkehrssicherheit, wenn dem Fahrer klar ist, mit welchen Risiken eine Weiterfahrt verbunden wäre. Hinzu kommt, dass auch gesellschaftliche Zwänge dazu führen können, dass die Fahrt fortgesetzt wird. Das Eingeständnis nicht mehr leistungsfähig zu sein oder eine Pause zu brauchen ist im heutigen Zeitmanagement kaum vorgesehen. Dies würde sich der Fahrer aber eingestehen, wenn er der Warnung Folge leistet. Zudem kommen noch persönliche motivationale Faktoren wie z.B. schnell nach Hause kommen zu wollen hinzu, die verhindern könnten, dass auf die Rückmeldung des Systems reagiert wird.

Hier sind natürlich die Grenzen eines Assistenzsystems erreicht und man müsste in der Gesellschaft ein Bewusstsein dafür schaffen, dass man nicht rund um die Uhr leistungsfähig sein kann.

Zur Lösung dieses gesellschaftlichen Problems kann die vorliegende Arbeit keinen Beitrag liefern, sie kann jedoch gute Wege aufzeigen, wie ein Müdigkeitsassistenzsystem ausgelegt werden kann, um den Fahrer bestmöglich zu unterstützen.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- Åkerstedt, T. (2000). Consensus Statement: Fatigue and accidents in transport operations. *J Sleep Res*, 9 (4), 395.
- Åkerstedt, T., Connor, J., Gray, A., & Kecklund, G. (2008). Predicting road crashes from a mathematical model of alertness regulation— The Sleep/Wake Predictor. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1480–1485.
- Åkerstedt, T. & Gillberg, M. (1990). Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, 52 (1-2), 29-37.
- Åkerstedt, T., Kecklund, G. & Hörte, L.-G. (2001). Night Driving, Season, and the Risk of Highway Accidents. *Sleep*, 24 (4), 401-406.
- Åkerstedt, T., Kecklund, G., Gillberg, M., Lowden, A. & Axelsson, J. (2000). Sleepiness and days of recovery. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 3 (4), 251-261.
- Åkerstedt, T., Torsvall, L. & Gillberg, M. (1987). Sleepiness in shiftwork: A review with emphasis on continuous monitoring of EEG and EOG. *Chronobiology International*, 42 (2), 129-140.
- Akin, M., Kurt, M., Sezgin, N., & Bayram, M. (2008). Estimating vigilanz level by using EEG and EMG signals. *Neural Comput. Appl.*, 17, 227–236.
- Altmüller, T. (2007). *Driver Monitoring and Drowsiness Detection by Steering Signal Analysis* (Dissertation). Universität der Bundeswehr, München.
- American Psychological Association (Hrsg.). (1928). *Psychological Bulletin: 37th Annual Meeting of the American Psychological Association* (Bd. 25). New York
- AMWF. (2008). *Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie* (4., überarbeitete Aufl.). Stuttgart, New York: Thieme.
- Anitei, M., Schuhfried, G. & Chraif, M. (2011). The influence of energy drinks and caffeine on time reaction and cognitive processes in young Romanian students. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 30, 662-670.
- Anund, A., Kecklund, G., Peters, B., & Åkerstedt, T. (2008). Driver sleepiness and individual differences in preferences for countermeasures. *Journal of Sleep Research*, 17(1), 16–22.
- Arnedt, J., Wilde, Gerald J. S., Munt, P. W. & MacLean, A. W. (2001). How do prolonged wakefulness and alcohol compare in the decrements they produce on a simulated driving task? *Accident Analysis & Prevention*, 33 (3), 337-344.
- Arnold, F. (2007). *Anatomische und physiologische Untersuchungen über das Auge des Menschen* (Reprint). Saarbrücken: VDM, Müller.
- Arzt, M. & Obermeier, R. (2010). Obstruktive Schlafapnoe bei Herzinsuffizienz. *Somnologie*, 14 (1), 48-55.
- Ataka, S., Tanaka, M., Nozaki, S., Mizuma, H., Mizuno, K., Tahara, T. et al. (2008). Effects of oral administration of caffeine and D-ribose on mental fatigue. *Nutrition*, 24 (3), 233-238.
- Baenninger, R., Binkley, S. & Baenninger, M. (1996). Field observations of yawning and activity in humans. *Physiology & Behavior*, 59 (3), 421-425.

- Barbé, F., Pericás, J., Munoz, A., Findley, L., Antó, J., Agusti, A. et al. (1998). Automobile Accidents in Patients with Sleep Apnea Syndrome . An Epidemiological and Mechanistic Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 158 (1), 18-22.
- Bartlett, F. C. (1943). Fatigue following highly skilled work. *Proceedings of the Royal Society, B131*, 247-257.
- Bartlett, F. C. (1948). *A note on early signs of skill fatigue* (MRC Flying Personal Research Comitee Report FPRC703). London: Medical Research Council.
- Bartley, S. H. & Chute, E. (1947). *Fatigue and impairment in man*. New York: McGraw Hill.
- Barwick, F., Arnett, P. & Slobounov, S. (2011). EEG correlates of fatigue during administration of a neuropsychological test battery. *Clinical Neurophysiology*.
- Baulk, S. D., Reid, K. J., Van den Heuvel, C.J. & Dawson, D. (2008). Chasing the silver bullet: Measuring driver fatigue using simple and complex tasks. *Accident Analysis & Prevention* (40), 396-402.
- Begg, D., Sullman, M. & Samaranayaka, A. (im Druck). The characteristics of young pre-licensed drivers: Evidence from the New Zealand Drivers Study. *Accident Analysis & Prevention*.
- Belz, S. M., Robinson, G. S. & Casali, J. G. (2004). Temporal Separation and Self-Rating of Alertness as Indicators of Driver Fatigue in Commercial Motor Vehicle Operators. *hfes*, 46 (1), 154-169.
- Bergasa, L., Nuevo, J., Sotelo, M., Barea, R., & Lopez, M. (2008). Visual Monitoring of Driver Inattention. In D. Prokhorov (Ed.), *Computational intelligence in automotive applications* (pp. 25–52). Berlin: Springer-Verlag.
- Berghaus, G., Sticht, G. & Grellner, W. (2011). Meta-analysis of emprical studies concerning the effects of medicines and illegal drugs including pharmacokinetics on safe driving, *DRUID: Driving under the Influence of Drugs, Alcohol and Medicines. Effects of stimulant drugs on actual and simulated driving*. Maastricht, Netherlands.
- Bernotat, R. (1964). Der Mensch als Element des Flugführungssystems. In Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), *Luftfahrttechnik - Raumfahrttechnik* (Bd. 10, S. 66–68). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Bixler, E. O., Vgontzas, A. N., Ten Have, T., Tyson, K. & Kales, A. (1998). Effects of Age on Sleep Apnea in Men. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 157 (1), 144-148.
- Bloch, K. E., Schoch, O. D., Zhang, J. N. & Russi, E. W. (1999). German version of the Epworth Sleepiness Scale. *Respiration*, 66, 440-447.
- BMW Connected Drive. (2011). *Nothalteassistent*. Verfügbar unter http://www.connecteddrive.info/index.php?option=com_content&view=article&id=71.
- Bodrov, V. A. (1988). Problems of fatigue in aircrews: Concepts, causes, features, calssification. *Human Physiology*, 14 (5), 368-375.
- Bornemann, E. (1952). Grundlagen der Ermüdungsverhütung. In E. Bornemann (Hrsg.), *Ermüdung, ihre Erscheinungsform und Verhütung*. . Lüneburg: Kinau.

- Bossi, L., Ward, N. J., Parkes, A. M. & Howarth, P. (1997). The effect of vision enhancement systems on driver peripheral visual performance. In Y. I. Noy (Hrsg.), *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces* (S. 239–260). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Boyle, L. N., Tiffin, J., Paul, A. & Rizzo, M. (2008). Driver performance in the moments surrounding a microsleep. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11 (2), 126-136.
- Brown, I. D. (1994). Driver fatigue. *Human Factors*, 36 (3), 298-314.
- Brunnauer, A. & Laux, G. (2008). Psychopharmaka und Verkehrssicherheit. *Journal für Neurologie Neurochirurgie und Psychiatrie*, 9 (2), 31-34.
- Brunner, S. (2009). *Einfluss eines akustischen Vigilanztests auf den pupillographischen Schläfrigkeitstest*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen-Nürnberg.
- Bühringer, Gottlieb & Kufeld. (2007). *Einführung in die Substanzstörungen*. Vorlesung, Technische Universität Dresden. Dresden. Verfügbar unter <http://www.psychologie.tu-dresden.de/i2/klinische/studium/ws0607/substanz-einfuehrung.pdf>.
- Cameron, C. (1973). A theory of fatigue. *Ergonomics*, 16 (5), 633-648.
- Caraty, M.-J., & Montacié, C. (2012). Vocal fatigue induced by prolonged oral reading: Analysis and detection. *Computer Speech & Language*. doi:10.1016/j.csl.2012.12.003.
- Carskadon, M. A. & Dement, W. (1977). Sleep tendency: an objective measure of sleep loss. *Sleep Research*, 6, 20.
- Catford, J. (1988). *A practical introduction to phonetics*. New York, NY, USA: Oxford University Press.
- Chee, M. W., Chuah, L. Y., Venkatraman, V., Chan, W. Y., Philip, P., & Dinges, D. F. (2006). Functional imaging of working memory following normal sleep and after 24 and 35 h of sleep deprivation: Correlations of fronto-parietal activation with performance. *NeuroImage*, 31(1), 419–428. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.12.001
- Chipman, M., & Jin, Y. L. (2009). Drowsy drivers: The effect of light and circadian rhythm on crash occurrence. *Safety Science*, 47, 1364–1370.
- Classen, M., Diehl, V., Kochsiek, K., Hallek, M., Böhm, M., & Schmiegel, W. (Eds.). (2009). *Innere Medizin: 6. komplett überarbeitete Ausgabe*. München: Elsevier.
- Cluydts, R., Valck, E. de, Verstraeten, E. & Theys, P. (2002). Daytime sleepiness and its evaluation. *Sleep Medicine Reviews*, 6 (2), 83-96.
- Contradi, S., Pizza, F., Sancisi, E. & Mondini, S. (2004). Reliability of a driving simulation task for evaluation of sleepiness. *Brain Research Bulletin*, 63 (5), 427-431.
- Crawford, A. (1961). Fatigue and driving. *Ergonomics*, 4, 143-154.
- Daimler Deutschland. (2009). *Attention Assist*. Verfügbar unter <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210218-49-1210332-1-0-0-1210228-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>.
- Davenne, D., Lericollais, R., Sagaspe, P., Taillard, J., Gauthier, A., Espié, S. et al. (im Druck). Reliability of simulator driving tool for evaluation of sleepiness, fatigue and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*.

- Dawson, D., Ian Noy, Y., Härmä, M., Åkerstedt, T., & Belenky, G. (2011). Modelling fatigue and the use of fatigue models in work settings. *Accident Analysis & Prevention*, 43(2), 549–564. doi:10.1016/j.aap.2009.12.030
- Desmond, P. A. & Matthews, G. (2009). Individual differences in stress and fatigue in two field studies of driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12 (4), 265-276.
- Diem, C. (2005). *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Strassenverkehr*. München: Utz.
- Di Milia, L., Smolensky, M. H., Costa, G., Howarth, H. D., Ohayon, M. M. & Philip, P. (2011). Demographic factors, fatigue, and driving accidents: An examination of the published literature. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (2), 516-532.
- Di Stasi, L. L., Renner, R., Catena, A., Cañas, J. J., Velichkovsky, B. M. & Pannasch, S. (2012). Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 21 (1), 122-133.
- DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. (2000). *DIN EN ISO 10075-1, Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeines und Begriffe (ISO 10075:1991); Deutsche Fassung EN ISO 10075-1:2000*. Berlin: Beuth.
- Dinges, D. & Powell, J. W. (1985). Microcomputer analysis of performance on a portable, simple visual RT task sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 17, 652-655.
- Dinges, D. F., Mallis, M. M., Maislin, G. & Powell, J. W. (1998). *Final Report: Evaluation of Techniques for Ocular Measurement as an Index of Fatigue and as the Basis for Alertness Management* (Nr. DOT HS 808 762). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration NHTSA.
- Donges, E. (1978). Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 24, 98-112.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 183-190.
- Ergoneers GmbH. (2009). *Dikablis Cable Handbuch* (Ergoneers GmbH, Hrsg.). Mansching: Ergoneers.
- Ergoneers GmbH. (2010a) Analysis [Computer software]: Ergoneers.
- Ergoneers GmbH. (2010b) Markerdetektor [Computer software]: Ergoneers.
- Ergoneers GmbH. (2010c) Recorder [Computer software]: Ergoneers.
- Ewert, U. (2003). *Übermüdung im Strassenverkehr* (Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu, Hrsg.), Bern.
- Fairclough, S. H. & Graham, R. (1999). Impairment of Driving Performance Caused by Sleep Deprivation or Alcohol: A Comparative Study. *hum factors*, 41 (1), 118-128.
- Fant, G. (1960). *The Acoustic Theory of Speech Production*. Den Haag, Niederlande: Mouton & Co.
- Fell, D. (1994). *Safety Update: Problem Definition and Countermeasure Summery: Fatigue (RUS 5)*. New South Wales: New South Wales Safety Bureau.

- Feng, R., Zhang, G., & Cheng, B. (2009). An On-Board System for Detecting Driver Drowsiness Based on Multi-Sensor Data Fusion Using Dempster-Shafer Theory. In *2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. March 26-29, 2009, Okayama, Japan (S. 897–902). [Piscataway, N.J.]: IEEE.
- Ferguson, S. A., Paech, G. M., Sargent, C., Darwent, D., Kennaway, D. J. & Roach, G. D. (2011). The influence of circadian time and sleep dose on subjective fatigue ratings. *Accident Analysis & Prevention*, 45s, 50-54.
- Fillmore, M., Blackburn, J. & Harrison, E. (2008). Acute disinhibiting effects of alcohol as a factor in risky driving behavior. *Drug Alcohol Depend*, 95 (1-2), 97-106.
- Findley, L., Unverzagt, M., Guchu, R., Fabrizio, M., Buckner, J. & Suratt, P. (1995). Vigilance and Automobile Accidents in Patients With Sleep Apnea or Narcolepsy. *Chest*, 108 (3), 619-624.
- Finkelman, J. M. (1994). A large database study of the factors associated with work-induced fatigue. Special Issue: Fatigue. *Human Factors*, 36 (2), 232-243.
- Flores, M., Armingol, J., & La Escalera, A. de. (2010). Driver Drowsiness Warning System Using Visual Information for Both Diurnal and Nocturnal Illumination Conditions. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1), 438205. doi:10.1155/2010/438205
- Fofanova, J. & Vollrath, M. (2011). Distraction while driving: The case of older drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14 (6), 638-648.
- Forsman, P. M., Vila, B. J., Short, R. A., Mott, C. G. & van Dongen, H. P. (2012). Efficient driver drowsiness detection at moderate levels of drowsiness. *Accident Analysis & Prevention*.
- Foxlin, E., Altshuler, Y., Naimark, L. & Harrington, M. FlightTracker: A Novel Optical/Inertial Tracker for Cockpit Enhanced Vision (S. 212–221).
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37 (3), 461-472.
- Galley, L., Hentschel, E. H. & Kuhn, K. P. (2005), G08B 21/06(2006.01)A, F, I, 20051017, B, H, DE. DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE (Anmelder), DE102005026456A1.
- Galley, N. (2011). *Perclosfunktion im asiatischem Raum* (mündlich).
- Galley, N. & Schleicher, R. (2004). Subjective and optomotoric indicators of driver drowsiness. In G. Underwood (Hrsg.), *Traffic and transport psychology. Proceedings of the ICTTP 2004* (S. 455–470). Amsterdam: Elsevier.
- Garbarino, S., Nobili, L., Beelke, M., Phy, F. & Ferrillo, F. (2001). The contributing role of sleepiness in highway vehicle accidents. *Sleep*, 24 (2), 203-206.
- Gershon, P., Shinar, D. & Ronen, A. (2009). Evaluation of experience-based fatigue countermeasures. *Accident Analysis & Prevention*, 41 (5), 969-975.
- Gershon, P., Shinar, D., Oron-Gilad, T., Parmet, Y. & Ronen, A. (2011). Usage and perceived effectiveness of fatigue countermeasures for professional and nonprofessional drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (3), 797-803.

- Gimeno, P. T., Cerezuela, G. P., & Montanes, M. C. (2006). On the concept and measurement of driver drowsiness, fatigue and inattention: implications for countermeasures. *International Journal of Vehicle Design*, 42(1/2), 67. doi:10.1504/IJVD.2006.010178
- Gjerde, H., Normann, P. T., Christophersen, A. S., Samuelsen, S. O. & Mørland, J. (2011). Alcohol, psychoactive drugs and fatal road traffic accidents in Norway: A case-control study. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (3), 1197-1203.
- Glaser, S., Mammar, S., Netto, M. & Luseti, B. *Experimental Time to Line Crossing Validation*. Vortrag anlässlich ITSC, Vienna.
- Global Infotech Pune. *No-Nap*. Zugriff am 17.02.2012. Verfügbar unter www.thenonap.com.
- Godthelp, H., Milgram, P. & Blaauw, G. J. (1984). The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 26 (3), 257-268.
- Golz, M., Sommer, D., Trutschel, U., Sirois, B. & Edwards, D. (2010). Evaluation of fatigue monitoring technologies. *Somnologie*, 14 (3), 187-199.
- Graubner, B. (2011). *ICD-10-GM 2011: Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme* (Version 2011 - Stand 5. Oktober 2010.). Köln: Dt. Ärzte-Verl.
- Greeley, H. P., Berg, J., Friets, E., Wilson, J., Greenough, G., Picone, J. et al. (2007). Fatigue estimation using voice analysis. *Behaviour Research Methods*, 39 (3), 610-619.
- Gunzelmann, G., Moore Jr., L. R., Salvucci, D. D. & Gluck, K. A. *Fluctuations in alertness and sustained attention: Predicting driver performance.*, Manchester.
- Hacker, W. (1998). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten* (1. Aufl.). *Schriften zur Arbeitspsychologie: Vol. 58*. Bern: Huber.
- Hagemeister, C. & Enderlein, C. (2008). Fahrverhalten, Ärger und Unfälle bei Kraftfahrern. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 54, 20-25.
- Hallvig, D., Anund, A., Fors, C., Kecklund, G., Karlsson, J. G., Wahde, M., & Åkerstedt, T. (2013). Sleepy driving on the real road and in the simulator—A comparison. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 44–50. doi:10.1016/j.aap.2012.09.033
- Hannemann, P. (2007). *Schlafapnoe-Syndrom: Ursache, Symptome, erfolgreiche Behandlung auch den banalen Schnarchens* (3., verb. und erw.). Zürich: Jopp.
- Hargutt, V. (2003). *Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen*. (VDI-Fortschritt-Bericht, Bd. 17). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hargutt, V., Körner, Y., Krüger, H.-P., & Maag, C. (2007). Ermüdung. In B. Madea, F. Musshoff, & M. G. Berghaus (Eds.), *Verkehrsmedizin. Fahreignung, Fahrsicherheit, Unfallrekonstruktion* (S. 599–606). Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
- Harrison, E. L. & Fillmore, M. T. (2011). Alcohol and distraction interact to impair driving performance. *Drug and Alcohol Dependence*, 117 (1), 31-37.
- Harrison, Y. & Horne, J. A. (1997). Sleep deprivation affects speech. *Sleep*, 20 (10), 871-877.

- Harwood, K., Barnett, B. & Wickens, C. D. (1998). Situational awareness: A conceptual and methodological framework. In F. McIntire (Hrsg.), *Proceedings of the 11th Biennial Psychology in the Department of Defense Symposium* (S. 23–27). Colorado Springs, CO: U.S. Air Force Academy.
- Haworth, N. L., Heffernan, C. J. & Horne, E. J. (1989). *Fatigue in truck accidents* (Monash University Accident Research Centre, Hrsg.) (Nr. 3), Victoria, Australia.
- Hell, W. (2008). *Müdigkeit im Straßenverkehr: unterschätzt verkannt tödlich* (Artikel-Nr. 2831141) (Deutscher Automobilclub e.V. (ADAC)), Hrsg. München.
- Hell, W. & Langwieder, K. (2001). *Einschlafunfälle im Straßenverkehr - Eine bisher oft verkannte Unfallursache: Auftretenshäufigkeit und Prävention* (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, Hrsg.), Essen.
- Helland, A., Jenssen, G. D., Lervåg, L.-E., Westin, A. A., Moen, T., Sakshaug, K., ... (2013). *Comparison of driving simulator performance with real driving after alcohol intake: A randomised, single blind, placebo-controlled, cross-over trial*.
- Herczeg, M. (2005). *Software-Ergonomie: Grundlagen der Mensch-Computer-Kommunikation* (2. Aufl.). München ;, Wien: Oldenbourg.
- Highway Safety Group. (2010). *DD850 Driver Fatigue Monitor*. Zugriff am 17.02.2012. Verfügbar unter <http://www.driverfatiguemonitor.com/dfm/dfm.html>.
- Hirvonen, K., Puttonen, S., Gould, K., Korpela, J., Koefoed, V. F. & Müller, K. (2010). Improving the saccade peak velocity measurement for detecting fatigue. *Journal of Neuroscience Methods*, 187 (2), 199-206.
- Hoddes, E., Dement, W. & Zarcone, V. (1972). The development and use of the Stanford Sleepiness Scale (SSS). *Psychophysiology*, 9, 150.
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P. & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation, *Simulation und Simulatoren 2003. Mobilität virtuell gestalten; Tagung Hamburg, 15. und 16. April 2003* (S. 385–404). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Horne, J. A. & Reyner, L. A. (1995). Sleep related vehicle accidents. *British Medical Journal*, 310, 565-567.
- Horne, J. A. & Reyner, L. A. (1996). Counteracting driver sleepiness: Effects of napping, caffeine, and placebo. *Psychophysiology*, 33, 306-309.
- Horne, J. A. & Reyner, L. A. (1999). Vehicle accidents related to sleep: a review. *Occupational and Environmental Medicine*, 56, 289-294.
- Horne, J. A. & Reyner, L. A. (2001). Sleep-related vehicle accidents: Some guides for road safety policies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 4, 63-74.
- Hu, S., & Zheng, G. (2009). Driver drowsiness detection with eyelid related parameters by support vector machine. *Expert Systems with Applications*, 36, 7651–7668.
- Human Factors Consult. (2011). *HFC Müdigkeits-Skala 2.0*.
- Johns, M. (1991). A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14 (6), 540-545.
- Johns, M. (2003). The amplitude-velocity ratio of blinks: a new method for monitoring drowsiness. *Sleep*, 26, 51–52.

- Jung, C. R. & Kelber, C. R. *A Lane Departure Warning System Using Lateral Offset With Uncalibrated Camera*. Vortrag anlässlich ITSC, Vienna.
- Kaida, K., Takahashi, M., Åkerstedt, T., Nakata, A., Otsuka, Y., Haratani, T., & Fukasawa, K. (2006). Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clinical Neurophysiology*, 117(7), 1574–1581. doi:10.1016/j.clinph.2006.03.011
- Käppler, W. D. & Bernotat, R. (1985). Wirksystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. In K. Rompe (Hrsg.), *Verkehrssicherheit und Wirksystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt*. Köln: TÜV-Rheinland.
- Karrer-Gauß, K. (2012). *Prospektive Bewertung von Systemen zur Müdigkeitsbewertung. Ableitung von Gestaltungsempfehlungen zur Vermeidung von Risikokompensation aus empirischen Untersuchungen* (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Keall, M. D., Frith, W. J. & Patterson, T. L. (2004). The influence of alcohol, age and number of passengers on the night-time risk of driver fatal injury in New Zealand. *Accident Analysis & Prevention*, 36 (1), 49-61.
- Kelley, C. R. (1968). *Manual and Automatic Control*. New York: Wiley.
- Kerr, J. (1991). Driving without attention mode (DWAM): a formalisation of inattentive states while driving. In Gale A., I. Brown, C. M. Haslegrave, I. Moorhead, & S. Taylor (Eds.), *Visioin in Vehicles III* (S. 473–479). North Holland: Elsevier.
- King, D. J., Mumford, K. D. & Siegmund, P. G. (1998). An Algorithm for Detecting Heavy-Truck Driver Fatigue from Steering Wheel Motion. In National Highway Traffic Safety Administration NHTSA (Hrsg.), *16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)* (S. 873–882). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration.
- Kollmer, H., Janßen, A. & Küçükay, F. (2007). Simulation kundennaher Betriebslasten für Fahrzeugkomponenten. In Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung* (Bd. 1990, S. 197–216). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kolrep, H., Rimini-Döring, M., Oehme, A., Jürgensohn, T., & Altmüller, T. (2005). Wie sieht "müde" aus? - Entwicklung und Validierung einer Skala zur Müdigkeitsbewertung von Kraftfahrern. In L. Urbas & C. Steffens (Eds.), *6. Berliner Werkstatt Mensch- Maschine-Systeme, Zustandserkennung und Systemgestaltung* (pp. 65–70). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kopf, M. (2005). Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 117–139). Berlin: Springer.
- Kos, D., Nagels, G., D'Hooghe, M. B., Duportail, M. & Kerckhofs, E. (2006). A rapid screening tool for fatigue impact in multiple sclerosis. *BMC Neurol*, 6 (1), 27.
- Kotterba, S., Rasche, K., Widdig, W., Duscha, C., Blombach, S., Schultze-Werninghaus, G. et al. (1998). Neuropsychological investigations and event-related potentials in obstructive sleep apnea syndrome before and during CPAP-therapy. *Journal of Neurological Sciences*, 159, 45-50.
- Krajewski, J. (2007). *Stimmbasierte akustische Schläfrigkeitsdetektion: Eine signalverarbeitungs-basierte und mustererkennungsalgorithmengestützte Verfahrensentwicklung*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal. Wuppertal.

- Krajewski, J., Batliner, A. & Golz, M. (2009). Acoustic sleepiness detection - Framework and validation of a speech adapted pattern recognition approach. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 41, 795-804.
- Krajewski, J., Schnieder, S., Sommer, D., Batliner, A. & Schuller, B. (im Druck). Applying multiple classifiers and non-linear dynamics features for detecting sleepiness from speech. *Neurocomputing*.
- Krajewski, J., Schnupp, T., Heinze, C., Schnieder, S., Laufenberg, T., Sommer, D. et al. (im Druck). A phonetic approach for detecting sleepiness from speech in simulated air traffic controller-communication. *Human Factors*.
- Krajewski, J., Sommer, D., Trutschel, U., Edwards, D., & Golz, M. (2009). Steering Wheel Behavior Based Estimation Of Fatigue. In University of Iowa (Ed.), *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment and Design* (S. 118–124). Iowa.
- Kröger, B. J. (2007). *Artikulatorische und akustische Phonetik; Ein Kurzüberblick*. Zugriff am 01.01.2012. Verfügbar unter http://www.phonetik.phoniatrie.rwth-aachen.de/bkroeger/documents/Kroeger_PhonetikSkript_2007.pdf.
- Ksta. (2010). *Schlafende Beifahrer machen müde*, Ksta. Zugriff am 25.10.2011.
- Kuypers, K. P. C., Samyn, N. & Ramaekers, J. G. (2006). MDMA and alcohol effects, combined and alone, on objective and subjective measures of actual driving performance and psychomotor function. *Psychopharmacology*, 187 (4), 467-475.
- Kuypers, K. P. C., Wingen, M., Samyn, N., Limbert, N. & Ramaekers, J. G. (2007). Acute effects of nocturnal doses of MDMA on measures of impulsivity and psychomotor performance throughout the night. *Psychopharmacology*, 192 (1), 111-119.
- Lajunen, T., Parker, D. & Summala, H. (2004). The Manchester Driver Behaviour Questionnaire: a cross-cultural study. *Accident Analysis & Prevention*, 36 (2), 231-238.
- Lamers, C. T. J., Ramaekers, J. G., Muntjewerff, N. D., Sikkema, K. L., Riedel, W. J., Samyn, N. et al. (2003). Dissociable Effects of a Single Dose of Ecstasy (MDMA) on Psychomotor Skills and Attentional Performance. *Journal of Psychopharmacology* (Journal of Psychopharmacology), 17 (4), 379-387.
- Larue, G. S., Rakotonirainy, A. & Pettitt, A. N. (2011). Driving performance impairments due to hypovigilance on monotonous roads. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (6), 2037-2046.
- Lee, C. & Abdel-Aty, M. (2008). Presence of passengers: Does it increase or reduce driver's crash potential? *Accident Analysis & Prevention*, 40 (5), 1703-1712.
- Lenné, M. G., Triggs, T. J. & Redman, J. R. (1998). Interactive effects of sleep deprivation, time of day, and driving experience. *Sleep*, 21 (1), 38-44.
- Lertzman, M., Wali, S. & Kryger, M. (1995). Sleep apnea a risk factor for poor driving. *Canadian Medical Association Journal*, 153 (8), 1063.
- Leung, A. S., Chan, C. C. H., Lee, A. H. S. & Lam, K. W. H. (2004). Visual Analogue Scale Correlations of Musculoskeletal Fatigue. *Perceptual and Motor Skills*, 99 (1), 235-246.
- Leven, W. (1991). *Blickverhalten von Konsumenten: Grundlagen, Messung und Anwendung in der Werbeforschung*. Heidelberg: Physica-Verlag.

- Li, W., He, Q.-c., Fan, X.-m. & Fei, Z.-m. (2012). Evaluation of driver fatigue on two channels of EEG data. *Neuroscience Letters*, 506 (2), 235-239.
- Lin, C.-F. & Ulsoy, A. G. (1996). Time to Lane Crossing and Characterization of its associated uncertainty. *ITS Journal - Intelligent Transportation Systems Journal*, 3 (2), 85-98.
- Liu, J., Zhang, C., & Zheng, C. (2010). EEG-based estimation of mental fatigue by using KPCA–HMM and complexity parameters. *Biomedical Signal Processing and Control*, 5(2), 124–130. doi:10.1016/j.bspc.2010.01.001
- Lowenstein, O., Feinberg, R. & Loewenfeld, I. (1963). Pupillary movements during acute and chronic fatigue: A new test for the objective evaluation of tiredness. *Investigative Ophthalmology*, 2 (2), 138-157.
- Lüllmann, H., Mohr, K. & Wehling, M. (2003). *Pharmakologie und Toxikologie: Arzneimittelwirkungen verstehen - Medikamente gezielt einsetzen : 47 Tabellen* (15. Aufl.). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- MacLean, A. W., Davies, D. R. & Thiele, K. (2003). The hazards and prevention of driving while sleepy. *Sleep Medicine Reviews*, 7 (6), 507-521.
- Mammar, S., Glaser, S. & Netto, M. (2006). Time to Line Crossing for Lane Departure Avoidance: A Theoretical Study and an Experimental Setting. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, 7 (2), 226-241.
- Mackworth, N. (1957). Vigilance. *The Advancement of Science*, 53, 389–393.
- Manstetten, D. (2008). *Bewertung des Fahrerzustands durch Analyse des Fahrerhaltens*. Vortrag auf der Sensor4Cars, 15. Oktober, 2008, Kempten.
- MathWorks. (2011) MATLAB The language of technical computing [Computer software]: The MathWorks Inc.
- May, J. F. & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12 (3), 218-224.
- Maycock, G. (1997). Sleepiness and driving: The experience of U.K. car drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 29 (4), 453-462.
- Mayer, K. C. (2011, 19. August). *Narkolepsie*. Verfügbar unter http://www.neuro24.de/show_glossar.php?id=1166.
- Merat, N., & Jamson, A. H. (2013). The effect of three low-cost engineering treatments on driver fatigue: A driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 8–15. doi:10.1016/j.aap.2012.09.017
- Mesken, J. (2006). *Determinants and consequences of drivers' emotions*. [S.l., [Groningen: s.n.]; University Library Groningen] [Host].
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do. In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human behavior and traffic safety*. New York: Plenum Press.
- Microsoft Corporation. (2011) Windows Live Movie Maker 2011 [Computer software]: Microsoft Corporation.
- Miles, W. (1926). Sleeping with the Eyes Open. *Scientific American*, 6, 489–492.

- Mizuno, K., Tanaka, M., Fukuda, S., Yamano, E., Shigihara, Y., Imai-Matsumura, K., & Watanabe, Y. (2011). Low visual information-processing speed and attention are predictors of fatigue in elementary and junior high school students. *Behavioral and Brain Functions*, 7(1), 20. doi:10.1186/1744-9081-7-20
- Moller, H. J., Kayumov, L., Bulmash, E. L., Nhan, J., Shapiro, C. M., BULMASH, E. et al. (2006). Simulator performance, microsleep episodes, and subjective sleepiness: normative data using convergent methodologies to assess driver drowsiness. *Journal of Psychosomatic Research*, 61 (3), 335-342.
- Monk, T. H. (1987). Subjective ratings of sleepiness - the underlying circadian mechanisms. *Sleep*, 10 (4), 343-353.
- Monk, T. H. (1989). A visual analogue scale technique to measure global vigor and affect. *Psychiatry Res*, 27, 89-99.
- Monk, T. H., & Folkard, S. W. A. I. (1996). Maintaining safety and high performance on shiftwork. *Applied Ergonomics*, 27(1), 17-23.
- Muhrer, E. (2011). *Die Rolle der Erwartung auf Fahrerfehler im Folgeverkehr und die Effekte teilautonomer Assistenz im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig.
- Muhrer, E. & Reinprecht, K. (2010). *Autofahren und Müdigkeit*. TU Braunschweig: Lehrstuhl für Ingenieur- und Verkehrspsychologie.
- Muhrer, E. & Vollrath, M. (2010a). *Fremdbewertungsskala: Unveröffentlichtes Dokument*. Braunschweig: TU Braunschweig.
- Muhrer, E. & Vollrath, M. (2010b). *Referenzierung der Müdigkeit, Unveröffentlichtes Dokument*. Braunschweig: TU Braunschweig.
- Muhrer, E., Reinprecht, K. & Vollrath, M. (2010). *Interraterreliabilität der SOMS: Unveröffentlichter Forschungsbericht*.
- Muhrer, E., Reinprecht, K., Schröder, M. & Vollrath, M. (2010). Müdigkeitswarnung zwischen Akzeptanz und Nutzen. *Blutalkohol*, 47 (5, Suppl. II), 36.
- Muttray, A., Hagenmeyer, L., Unold, B., Du Perl, J. & Geißler, B. (2007). Videoanalyse der Schläfrigkeit von Fahrern - eine Pilotstudie. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed*, 42, 184-185.
- National Highway Traffic Safety Administration NHTSA. (2009). *Traffic Safety Facts: Reserch Note* (DOT HS 811 216). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration NHTSA.
- National Institute on Drug Abuse. (2009). *Hallucinogens: LSD, Peyote, Psilocybin, and PCP*, National Institute of Health. Zugriff am 07.10.2011. Verfügbar unter <http://www.drugabuse.gov/pdf/infofacts/Hallucinogens09.pdf>.
- National Instruments. (2011). Diadem 2011 [Computer software]: National Instruments Ireland Resources Limited.
- NCSDR/NHTSA. (2001). A panel on driver fatigue and sleepiness: *Drowsy Driving and Automobile*. : NCSDR/NHTSA. Verfügbar unter http://www.nhtsa.gov/people/injury/drowsy_driving1/drowsy.html#NCSDR/NHTSA.
- Neuberger, G. B. (2003). Measures of fatigue: The Fatigue Questionnaire, Fatigue Severity Scale, Multidimensional Assessment of Fatigue Scale, and Short Form-36 Vitality (Energy/Fatigue) Subscale of the Short Form Health Survey. *Arthritis & Rheumatism*, 49 (S5), S175-S183.

- Niederl, T. (2007a). *Untersuchung zu kumulativen psychischen und physiologischen Effekten des fliegenden Personals auf Kurzstrecke* (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Hrsg.) (Forschungsbericht 2007-17), Köln
- Niederl, T. (2007b). *Untersuchung zu kumulativen psychischen und physischen Effekten des fliegenden Personals auf Kurzstrecke*. Dissertation, Universität Kassel. Kassel
- Nilsson, P. J., Söderström, M., Karlsson, U. A., Lekander, M., Åkerstedt, T., Lindroth, N. E. et al. (2005). Less effective executive functioning after one night's sleep deprivation. *Journal of Sleep Research*, 14, 1-6.
- Nitsch, J. (1971). *Theorie und Skalierung der Ermüdung. Eine Studie zum Beanspruchungsproblem*. Unveröffentlichte Dissertation, Technische Universität Berlin. Berlin.
- Noy, Y. I., Horrey, W. J., Popkin, S. M., Folkard, S., Howarth, H. D. & Courtney, T. K. (2011). Future directions in fatigue and safety research. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (2), 495-497.
- Okogbaa, O. G., Shell, R. L. & Filipusic, D. (1994). On the investigation of the neurophysiological correlates of knowledge worker mental fatigue using the EEG signal. *Applied Ergonomics*, 25 (6), 355-365.
- Olson, W. C. & Cunningham, E. M. (1934). Time-Sampling-Techniques. *Child Development*, 5 (1), 41-52.
- Oron-Gilad, T., Ronen, A. & Shinar, D. (2008). Alertness maintaining tasks (AMTs) while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (3), 851-860.
- Östlund, J., Nilsson, L., Carsten, O., Merat, N., Jamson, H., Jamson, S. et al. (2004). *HASTE Human Maschine Interface and the safety of Traffic in Europe: HMI and Safety-Related Driver Performance* (Project GRD1/2000/25361 S12.319626).
- Otmani, S., Roge, J. & Muzet, A. (2005). Sleepiness in professional drivers: Effect of age and time of day. *Accident Analysis & Prevention*, 37 (5), 930-937.
- Pack, A., Pack, A., Rodgman, E., Cucchiara, A., Dinges, D. F. & Schwab, C. (1995). Characteristics of crashes attributed to the driver having fallen asleep. *Accident Analysis & Prevention*, 27 (6), 769-775.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 30 (3), 286-297.
- Patel, M., Lal, S., Kavanagh, D., & Rossiter, P. (2011). Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7235–7242. doi:10.1016/j.eswa.2010.12.028
- Paul, A. (2011). ZF Friedrichshafen (Anmelder), WO/2011/088947.
- Paul, A., Boyle, L. N., Tippin, J. & Rizzo, M. (2005). Variability of Driving Performance During Microsleep. In University of Iowa (Hrsg.), *Proceedings of the 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design. Driving assessment 2005 : Samoset Resort on the Ocean, Rockport, Maine, USA, June 27-30, 2005* (S. 18–24). Iowa City, Iowa: University of Iowa, Public Policy Center.
- Pawlik, K. (2006). *Handbuch Psychologie: Wissenschaft - Anwendung - Berufsfelder* (1st ed.). Berlin: Springer-Verlag.

- Pêcher, C., Lemerrier, C. & Cellier, J.-M. (2009). Emotions drive attention: Effects on driver's behaviour. *Safety Science*, 47 (9), 1254-1259.
- Pertwee, R. G. (2004). Pharmacological and therapeutic targets for tetrahydrocannabinol and cannabidiol. *Euphytica*, 140 (1-2), 73-82.
- Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C. et al. (2005a). Fatigue, sleep restriction and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 37 (3), 473-478.
- Philip, P., Sagaspe, P., Taillard, J., Valtat, C., Moore, N., Åkerstedt, T. et al. (2005b). Fatigue, Sleepiness, and Performance in Simulated Versus Real Driving Conditions. *Sleep*, 28 (12), 1511-1516.
- Philip, P., Vervialle, F., Breton, P. L., Taillard, J. & Horne, J. A. (2001). Fatigue, alcohol, and serious road crashes in France: factorial study of national data. *British Medical Journal*, 322 (7290), 829-830.
- Pizza, F., Contradi, S., Mostacci, B. & Cirignotta, F. (2004). A driving simulator task: Correlations with Multiple Sleep Latency Test. *Brain Research Bulletin*, 63 (5), 423-426.
- Platonov, K. K. (1994). Classification of degrees of overfatigue of aircrew. *Voenno-Meditinskii Zhurnal*, 7-8, 43.
- Prasad, B., Choi, Y. K., Weaver, T. E. & Carley, D. W. (2011). Pupillometric Assessment of Sleepiness in Narcolepsy. *Front. Psychiatry*, 2.
- Radun, I. & Summala, H. (2004). Sleep-related Fatal Vehicle Accidents: Characteristics of Decisions Made by Multidisciplinary Investigation Teams. *Sleep*, 27 (2), 224-227.
- Rakauskas, M. E., Ward, N. J., Boer, E. R., Bernat, E. M., Cadwallader, M. & Patrick, C. J. (2008). Combined effects of alcohol and distraction on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (5), 1742-1749.
- Rasmussen, J. (1987). Skills, Rules, and Knowledge: Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. In A. P. Sage (Hrsg.), *System design for human interaction* (3. Aufl., S. 257–266). New York: IEEE Press.
- Regan, M. A., Lee, J. D. & Young, K. L. (Hrsg.). (2009). *Driver Distraction: Theory, Effect, and Mitigation*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Regen, F. M. T. E. (2009). *Assoziation zwischen Pupillen-Unruhe-Index (PUI) und Korrelaten des zentralnervösen Aktivierungsniveaus im Wach-EEG*. Dissertation, Charité Universitätsmedizin Berlin. Berlin.
- Reichart, G. & Haller, R. (1995). Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In W. Fastenmeier (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation, Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Köln: TÜV-Rheinland.
- Reinprecht, K. (2012). *Alkohol- und Müdigkeitsunfälle Oktober 2011*. Braunschweig (Unveröffentlichtes Dokument).
- Reinprecht, K. & Vollrath, M. (2011). *Blicke in der Nacht – Ist das real?* Beitrag auf der 53. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Halle an der Saale, 13.03.-16.03.2011.

- Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2011b). Lichtassistentz wirkt - auch bei müden Fahrern. In Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und -dienste Niedersachsen e.V. (Hrsg.), *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 136–149). Braunschweig: ITS - Niedersachsen e.V.
- Reinprecht, K., Muhrer, E. & Vollrath, M. (2012). *Die Effekte von Lichtwarnsystemen auf die Reaktionsfähigkeit der Fahrer unter dem besonderen Einfluss des Fahrerzustands Müdigkeit*. 5. VDI-Tagung Fahrerassistenz, Schwerpunkt Vernetzung (S. 1-12). München: TÜV Süd.
- Reiß, J. & Krüger, H.-P. (1995). Einschlafen am Steuer - Ursachen, Folgen, Gegenmaßnahmen. *Psycho*, 21.
- Reitter, C. (2000). *Beanspruchung des Autofahers durch Monotonie. Eine Untersuchung mit blick- und lidmotorischen Parametern* (Dissertation). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Reyner, L. A. & Horne, J. A. (1998). Evaluation of "In-Car" Countermeasure to Sleepiness: Cold Air and Radio. *Sleep*, 21 (1), 46-51.
- Risser, R., Ware, C. J. & Freeman, F. (2000). Driving simulation with EEG monitoring in normal and obstructive sleep apnea patients. *Sleep*, 23 (3), 1-6.
- Rogé, J., Otmani, S., Bonnefond, A., Pébayle, T. & Muzet, A. (2009). Effect of a short nap on the alertness of young drivers: Repercussion on the perception of motorcycles according to extent of the useful visual field of the driver. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12 (2), 143-154.
- Roidl, E., Frehse, B., Pfister, R. & Höger, R. (2011, März). *Emotionale Zustände des Fahrers und die Auswirkungen auf das Fahrverhalten – eine Simulatorstudie*, Halle (Saale).
- Ronen, A., Chassidim, H. S., Gershon, P., Parmet, Y., Rabinovich, A., Bar-Hamburger, R. et al. (2010). The effect of alcohol, THC and their combination on perceived effects, willingness to drive and performance of driving and non-driving tasks. *Accident Analysis & Prevention*, 42 (6), 1855-1865.
- Rößger, E., Zehle, H. & Wernicke, J. (1962). Vorgang und Terminologie der Raumfahrzeugführung. *Luftfahrttechnik*, 8, 208.
- SafetyNet. (2009). *Fatigue*. Zugriff am 24.10.2011. Verfügbar unter http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/pdf/fatigue.pdf.
- Sagberg, F. (1999). Road accidents caused by drivers falling asleep. *Accident Analysis & Prevention*, 31 (6), 639-649.
- Sahayadhas, A., Sundaraj, K., & Murugappan, M. (2012). Detecting Driver Drowsiness Based on Sensors: A Review. *Sensors*, 12(12), 16937–16953. doi:10.3390/s121216937
- Samn, S. & Perelli, L. (1982). *Estimating aircrew fatigue: a technique with application to airlift operations* (Technical Report SAM-TR-82-21). Brooks AFB, TX: USAF School of Aerospace Medicine.
- Schleicher, R., Galley, N., Briest, S. & Galley, L. (2008). Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? *Ergonomics*, 51 (7), 982-1010.
- Schmidt, E. A. (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis & Prevention*, 41, 1087–1093.

- Schmidt, E. (2010). *Die objektive Erfassung von Müdigkeit während monotoner Tagfahrten und deren verbale Selbsteinschätzung durch den Fahrer*. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Düsseldorf.
- Schmidtke, H. (1965). *Die Ermüdung. Symptome, Theorien, Messversuche*. Bern: Hans Huber.
- Schmidtke, H. (1993). *Ergonomie* (3. Aufl.). München: Hanser.
- Schramm, T., Fuchs, K., Wagner, N. & Bruder, R. (2009). Detektion von Fahrermüdigkeit anhand des Lenkwinkelsignals. In J. Adenauer, M. Elepfandt, A. Lichtenstein & S. Schmidt (Hrsg.), 8. *Berliner Werkstatt Mensch-Maschine Systeme. Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme* (S. 129–134). Berlin: Technische Universität Berlin.
- Shahid, A., Shen, J. & Shapiro, C. M. (2010). Measurements of sleepiness and fatigue. *Journal of Psychosomatic Research*, 69 (1), 81-89.
- Siegrist, S. (1996). *Alkohol und illegale Drogen im Strassenverkehr: Ausmass, Risiken, Massnahmen* (Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu, Hrsg.), Ostermundigen. Verfügbar unter http://www.bfu.ch/PDFLib/564_105.pdf.
- Skipper, J. H. & Wierwille, W. W. (1986). Drowsy driver detection using discriminant analysis. *Human Factors*, 28 (5), 527-540.
- Smolensky, M. H., Di Milia, L., Ohayon, M. M. & Philip, P. (2011). Sleep disorders, medical conditions, and road accident risk. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (2), 533-548.
- Spath, D. (2004). *Gesundheits- und leistungsförderliche Gestaltung geistiger Arbeit: Arbeitsgestaltung unter Einbeziehung menschlicher Eigenzeiten und Rhythmen*. Berlin: Erich Schmidt.
- Stangl, W. (2011a). *Werner Stangls Arbeitsblätter: Kokain - Crack*. Zugriff am 07.10.2011. Verfügbar unter <http://arbeitsblaetter.stangl-taller.at/SUCHT/Kokain.shtml>.
- Stangl, W. (2011b). *Werner Stangls Arbeitsblätter: Drogen*. Zugriff am 07.10.2011. Verfügbar unter <http://arbeitsblaetter.stangl-taller.at/SUCHT/Drogen.shtml>.
- Stanton, N. A. & Pinto, M. (2000). Behavioural compensation by drivers of a simulator when using a vision enhancement system. *Ergonomics*, 43 (9), 1359-1370.
- Statistisches Bundesamt. (2012a). *Verkehr: Verkehrsunfälle - Zeitreihe 2011*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (2012b). *Verkehr: Verkehrsunfälle 2011* (Fachserie 8 No. 7). Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt Deutschland. (2010). *Umwelt: Trend zum spritsparenden Auto bremst Kraftstoffverbrauch*. Statistisches Bundesamt Deutschland. Zugriff am 11.11.2011.
- Statistisches Bundesamt Deutschland. (2011a). *Verkehr: Verkehrsunfälle Juni 2011* (Statistisches Bundesamt Deutschland, Hrsg.) (Fachserie 8 Reihe 7), Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt Deutschland. (2011b). *Verkehr: Verkehrsunfälle 2010* (Fachserie 8 Reihe 7). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt Deutschland.
- Staudacher, W. (2011). *Alkohol und Drogenkontrolle im Straßenverkehr*. Symposium Verkehrspsychologie, Leoben.

- Stephan, K. (2005). *Wach-am-Steuer-Tipps: DLR Aktionstag für mehr Verkehrssicherheit*. Verfügbar unter http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-2763/1904_read-325/1904_page-3/.
- Summala, H. & Mikkola, T. (1994). Fatal accidents among car and truck drivers: Effects of fatigue, age, and alcohol consumption. *Human Factors*, 36 (2), 315-326.
- Takchita, H., Katsuya, M., Kazunori, S., & Yuji, M. (2002). Detecting Drowsiness while Driving by Measuring Eye Movements - A Pilot Study. In IEEE (Ed.), *International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 156–161.
- Thiffault, P. & Bergeron, J. (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 35 (3), 381-391.
- Ting, P. H., Hwang, J. R., Doong, J. L., & Jeng, M. C. (2008). Driver fatigue and highway driving: A simulator study. *Physiology & Behavior*, 94(3), 448–453. doi:10.1016/j.physbeh.2008.02.015
- Trenkwalder, C. (1998). *Restless-legs-Syndrom: Klinik, Differentialdiagnose, Neurophysiologie, Therapie ; mit 9 Tabellen*. Berlin [u.a.]: Springer.
- TÜV-Süd. (2011, 07. Oktober). *Wirkung von Drogen*. Verfügbar unter http://www.tuev-sued.de/fuehrerschein_pruefung/aktuell_informiert/alkohol_und_drogen_im_strassenverkehr/wirkung_von_alkohol.
- Ulich, E. (2001). *Arbeitspsychologie*. Zürich: vdf, Hochschulverlag.
- Van der Horst, R. (2007). Time-related measures for modeling risk in driver behaviour. In P. C. Cacciabue (Hrsg.), *Modelling driver behaviour in automotive environments. Critical issues in driver interactions with intelligent transport systems* (S. 235–252). London: Springer.
- Van der Hulst, M. (1999). Anticipation and the adaptive control of safety margins in driving. *Ergonomics*, 42 (2), 336-345.
- Vanlaar, W., Simpson, H., Mayhew, D. & Robertson, R. (2008). Fatigued and drowsy driving: A survey of attitudes, opinions and behaviors. *Journal of Safety Research*, 39 (3), 303-309.
- Vector Informatik GmbH. (2009) CANape 9.0 [Computer software].
- Veldstra, J. L., Brookhuis, K. A., De Waard, D., Molmans, B. H. W., Verstraete, A. & Skoop, G. (2011) Effects of alcohol (BAC 0.5‰) and ecstasy (MDMA 100mg) on (simulated) driving performance, driving related performance and traffic safety, *DRUID: Driving under the Influence of Drugs, Alcohol and Medicines. Effects of stimulant drugs on actual and simulated driving*. Maastricht, Netherlands.
- Vingilis, E. & Macdonald, S. (2002). Review: Drugs and Traffic Collisions. *Traffic Injury Prevention*, 3 (1), 1-11.
- Volk, S., Dyroff, J., Georgi, K. & Pflug, B. (1994). Subjective sleepiness and physiological sleep tendency in healthy young morning and evening subjects. *Journal of Sleep Research*, 3 (3), 138-143.
- Volkswagen AG Group Research. (2011). *Müdigkeitserkennung*. Verfügbar unter http://www.volkswagen.de/de/models/der_neue_passat/highlights.fallback.s7_layerr.suffix.html/features~2Feditorial_highlights~2Fder_ganzneue_passat~2Ffahrerassistenzsysteme~2Fmuedigkeitserkennung/selection=4.html?frontend-debug=true.

- Vollrath, M. (1994). Automatic measurement of aspects of speech reflecting motor coordination. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 26 (1), 35-40.
- Vollrath, M. & Krems, J. (2010). *Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Vural, E., Cetin, M., Ercil, A., Littlewort, G., Bartlett, M., & Movellan, J. (2007). Drowsy driver detection through facial movement analysis. *Human Computer Interaction*, (4796), 6–18.
- Wallentowitz, H. & Neunzig, D. (2005). Fahrerassistenz für ältere Menschen. In W. Echtermann (Hrsg.), *Mobilität und Alter. Strategie zur Sicherung der Mobilität älterer Menschen* (Bd. 01, S. 117–135). TÜV-Verlag GmbH.
- Walls, G. (1962). The evolutionary history of eye movements. *Vision Research*, 2, 69–80.
- Walzl, M. (2009). *Schläfrig am Steuer? Pupillometrische Untersuchungen an PKW-Lenkern* (Bundesministerium für Verkehr, I. u. T., Hrsg.), Graz
- Weeß, H.-G., Sauter, C., Geisler, P., Bohning, W., Wilhelm, B., Rotte, M. et al. (2000). Vigilanz, Einschlafneigung, Daueraufmerksamkeit, Müdigkeit, Schläfrigkeit Diagnostische Instrumentarien zur Messung müdigkeits- und schläfrigkeitsbezogener Prozesse und deren Gutekriterien. *Somnologie*, 4 (1), 20-38.
- Weigle, S. C. (1994). Effects of training on raters of ESL compositions. *Language Testing*, 11(2), 197–223. doi:10.1177/026553229401100206
- Weilkes, M. (2000). *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystem mittels Simulation*. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen Aachen GmbH.
- Whitmore, J. & Fisher, S. (1996). Speech during sustained operation. *Speech Commun.*, 20 (1-2), 55-70.
- Wierwille, W. W. (1999). Historical perspective on slow eyelid closure: Whence PERCLOS? In R. J. Carroll (Hrsg.), *Ocular measure of driver alertness. Technical conference proceedings* (S. 31–53)
- Wierwille, W. W. & Ellsworth, L. A. (1994). Evaluation of driver drowsiness by trained raters. *Accident Analysis & Prevention*, 26 (5), 571-581.
- Wierwille, W. W., Ellsworth, L. A., Wreggit, S., Fairbanks, R. & Krin, C. (1994). *Research on vehicle-based driver status/performance monitoring: development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness* (Nr. DOT HS 808 247). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration NHTSA.
- Wilde, G. J. S. (1974). Wirkung und Nutzen von Verkehrssicherheitskampagnen. Ergebnisse und Forderungen - ein Überblick. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 20 (4), 227-238.
- Wilhelm, B. (2006). *Über die Spontanoszillationen der Pupille und ihre Beziehung zum zentralnervösen Aktivierungsniveau* (1. Aufl.). Stuttgart, Berlin: Steinbeis-Ed.
- Wilhelm, B. (2010). *Prävention schläfrigkeitsbedingter Verkehrsunfälle in Deutschland - Welchen Beitrag kann die Pupillographie leisten?*, Tübingen.

- Wilhelm, B., Heine, C., Widmann, A., Durst, W., Lüdtke, H. & Otto, G. (2010). How sleepy are construction workers during extended shifts? *Somnologie*, 14 (3), 200-206.
- Wilhelm, B., Wilhelm, H., Lüdtke, H., Streicher, P. & Adler, M. (1998). Pupillographic Assessment of Sleepiness in Sleep-deprived Healthy Subjects. *Sleep*, 21 (3), 258-265.
- Williamson, A. M., Feyer, A.-M., Mattick, R. P., Friswell, R. & Finlay-Brown, S. (2001). Developing measures of fatigue using an alcohol comparison to validate the effects of fatigue on performance. *Accident Analysis & Prevention*, 33 (3), 313-326.
- Williamson, A., Lombardi, D. A., Folkard, S., Stutts, J. C., Courtney, T. K. & Connor, J. (2011). The link between fatigue and safety. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (2), 498-515.
- Wiltchko, T. (2004). *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten* (VDI, Hrsg.) (12 Nr. 570), Düsseldorf.
- Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (Hrsg.). (2009). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (1. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg & Teubner.
- Winsum van, W., Brookhuis, K. A. & De Waard, D. (2000). A comparison of different ways to approximate time-to-line crossing (TLC) during car driving. *Accident Analysis & Prevention*, 32 (1), 47-56.
- Wolshrijn, H., de Gier, J. & de Smet, P. (1991). *Drugs and driving: a new categorization system for drugs affecting psychomotor performance* (University of Limburg, Hrsg.). Limburg (S. 91–124).
- World Health Organisation. (2011). *Psychoactive Substance*. Zugriff am 07.10.2011. Verfügbar unter http://www.who.int/substance_abuse/terminology/psychoactive_substances/en/index.html.
- Wright, N. & McGown, A. (2001). Vigilance on the civil flight deck: incidence of sleepiness and sleep during long-haul flights and associated changes in physiological parameters. *Ergonomics*, 44 (1), 82-106.
- Wright, N., Stone, B., Horberry, T. & Reed, N. (2007). *A Review of In-Vehicle Sleepiness Detection Devices* (Transport Research Laboratory Limited/QinetiQ, Hrsg.) (Nr. PPRO 4/001/017), Wokingham, UK.
- Wu, H. & Yan-Go, F. (1996). Self-reported automobile accidents involving patients with obstructive sleep apnea. *Neurology*, 46, 1254-1257.
- Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH. (2009). *SILAB. Änderungen/Neuerungen in der Version 2.5*, Würzburg.
- Young, K. L., Regan, M. A. & Hammer, M. (2003). *Driver distraction: A review of the literature*. Clayton, Vic: Monash University Accident Research Centre.
- Zakletskaia, L. I., Mundt, M. P., Balousek, S. L., Wilson, E. L. & Fleming, M. F. (2009). Alcohol-impaired driving behavior and sensation-seeking disposition in a college population receiving routine care at campus health services centers. *Accident Analysis & Prevention*, 41 (3), 380-386.

- Zambou, N. (2005). Lagrange-basierte und modellgestützte Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung im Konvoi. In Fortschritt-Berichte VDI (Hrsg.), *Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik* (Bd. 1074, 8. Aufl.). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Zulley, J. (1997). Grundlagen Zirkadiane Rhythmen und Schlaf beim Menschen. In H. Schulz (Hrsg.), *Kompendium Schlafmedizin für Ausbildung, Klinik und Praxis* (S. 343–352). Landsberg: Ecomed.
- Zulley, J., & Kautzmann, G. (2005). *Mein Buch vom guten Schlaf: Endlich wieder richtig schlafen ; was nachts in unserem Körper abläuft ; Schlafstörungen erkennen und natürlich behandeln ; mit großem Schlaftest* (1st ed.). München: Zabert Sandmann.
- Zulley, J., & Knab, B. (2009). *Wach und fit: Mehr Energie, Leistungsfähigkeit und Ausgeglichenheit*. Frankfurt, M: Mabuse-Verl.
- Zulley, J., Crönlein, T., Hell, W. & Langwieder, K. (1995). Einschlafen am Steuer: Hauptursache schwerer Verkehrsunfälle. *Wiener Medizinische Wochenzeitschrift*, 117/18, 473.